

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.391.26

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 172. Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва спеціальності)

на тему: Моделі впливу механічного тиску н електричні параметри
компонентів біполярних ІМС _____

Виконав : студент 2-го курсу, групи ДК-71мн
(шифр групи)

Зилевіч Максим Олегович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к. т. н., доц. Кучернюк П. В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою
програмою

Спеціальність (спеціалізація) 172 – Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Зилевічу Максиму Олеговичу

1. Тема дисертації – Моделі впливу механічного тиску на електричні
параметри компонентів біполярних ІМС.

науковий керівник дисертації к. т. н., доц. Кучернюк П. В.

затверджені наказом по університету від «25» березня 2019р. №959-с

2. Строк подання студентом дисертації 21.05.19

3. Об'єкт дослідження – процес впливу делямінації на характеристики
біполярних ІМС.

4. Предмет дослідження – моделі впливу тиску на електричні характеристики
біполярних ІМС та методи компенсації такого впливу.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розглянути теоретичні основи фізики процесу пливу тиску на електричні характеристики напівпровідникових приладів, розробити метод експериментального вимірювання зміни електричних характеристик кремнієвих приладів під дією тиску, розробити та перевірити на адекватність математичну модель такого впливу, визначити вплив тиску на зміну електричних параметрів біполярних ІМС автомобільної промисловості, визначити та перевірити методи компенсації такого впливу, розробити стартап-проект по проектуванню і виготовленню біполярних ІМС з покращеними характеристиками.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу – презентація у форматі PowerPoint.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 публікація.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 10.09.17

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз тематичної літератури	10.06.18	Виконав
2.	Розробка та перевірка математичних моделей впливу тиску на характеристики компонентів біполярних ІМС	06.12.18	Виконав
3.	Розробка та перевірка моделі впливу тиску на характеристики біполярних ІМС.	24.03.19	Виконав
4.	Визначення та перевірка методів компенсації впливу тиску на електричні характеристики біполярних ІМС	02.04.19	Виконав
5.	Розробка стартап-проекту	15.04.19	Виконав
6.	Оформлення дисертації	28.04.19	Виконав

Студент

(підпис)

Зилевіч М. О.

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Кучернюк П. В.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 119 сторінок, в якій міститься 31 рисунок, 54 таблиці та використано 43 джерела за переліком посилань.

Актуальність. Збільшення надійності мікросхем є актуальним завданням сьогодення. Оскільки електронні пристрої здебільшого складаються з сукупності мікросхем, то їхня надійність визначається надійністю використовуваних мікросхем. Однією зі складових надійності мікросхем є сталість їх електричних характеристик при впливі зовнішніх факторів таких як температура і вологість довколишньої середовища, механічні деформації. Особливу увагу заслуговує вплив механічної деформації на електричні характеристики. Під таким впливом розуміють безпосередню деформацію, а саме вплив тиску, повздовжні та поперечні вигини мікросхеми. В реальних умовах такий вплив спричиняють деламінаційні процеси в товщі корпусу мікросхеми. Внаслідок деламінації виникає неоднорідна деформація між кристалом мікросхеми та її корпусом. Внаслідок чого виникає тиск, що діє на кристал мікросхеми і є достатнім для зміни електричних характеристик останнього.

Фізику процесу впливу деформації на характеристики напівпровідникового кремнію досліджували як вітчизняні так і закордонні науковці. Провівши аналіз наукової літератури визначено, що фізика впливу деформації на напівпровідникові прилади є повністю теоретично описаною. Емпіричним шляхом отримано основні формули, які описують зміну певної характеристики напівпровідникового кремнію під дією тиску. Проте не існує математичних моделей впливу тиску на електричні характеристики напівпровідникових приладів. А також відсутня інформація про методи компенсації такого впливу.

Проведений патентний пошук показав відсутність запатентованих математичних моделей впливу тиску на характеристики напівпровідникових

приладів. Також не знайдено запатентованих методів компенсації такого впливу.

Таким чином, на сьогоднішній день існує лише теоретичне описання фізики процесу впливу тиску на характеристики напівпровідникових компонентів, а також виведено основні формули які описують зміну електричних характеристик кремнію під дією тиску. Проте не існує математичної моделі, яка б описувала вплив тиску на електричні характеристики напівпровідникових приладів, а також не описані методи компенсації такого впливу. З цього слідує, що дане дослідження є актуальним, оскільки досі є невирішені питання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилось у відповідності з науковими напрямками роботи кафедри конструювання електронно-обчислюваної апаратури КПІ ім. Ігоря Сікорського та пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки України “Інформаційні та комунікаційні технології”.

Мета. Підвищення точності математичних моделей активних компонентів біполярних ІМС шляхом врахування впливу тиску на їх електричні характеристики.

Задачі. Для досягнення поставленої мети в даній дисертації необхідно вирішити такі задачі:

- розглянути теоретичні основи фізики процесу впливу тиску на електричні характеристики напівпровідникових приладів;
- проаналізувати та обґрунтувати вибір методу експериментального вимірювання зміни електричних характеристик кремнієвих приладів під дією тиску;
- розробити та перевірити на адекватність математичну модель такого впливу;
- визначити вплив тиску на зміну електричних параметрів біполярних ІМС автомобільної промисловості;
- визначити та перевірити методи компенсації такого впливу;

- розробити стартап-проект по проектуванню і виготовленню біполярних ІМС з покращеними характеристиками.

Об'єктом дослідження є процес впливу деламінації на характеристики біполярних ІМС.

Предметом дослідження є моделі впливу тиску на електричні характеристики біполярних ІМС та методи компенсації такого впливу.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використовувались методи аналізу та синтезу, дедукції і математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в наступному:

- встановлено, що залежність ширини забороненої зони від тиску має нелінійний характер, розроблена її апроксимаційна модель та розраховано її коефіцієнти. Похибка запропонованої моделі не перевищує 2 %;
- встановлено, що коефіцієнт підсилення за струмом біполярних транзисторів не залежить від зовнішнього тиску. Це дозволяє зробити висновок про те, що дрейфовий механізм переносу неосновних носіїв через базу (визначає колекторний струм) і рекомбінаційні механізми в базі (визначає струм бази) мають однакову природу залежності від ширини забороненої зони;
- розроблено уточнені моделі впливу тиску на напівпровідникові резистори, діоди і біполярні транзистори, які можуть бути використані для вирішення задач схемотехнічного аналізу і проектування біполярних ІМС. Похибка запропонованих моделей не перевищує 2,5 %.

Практичне значення отриманих результатів визначається створеною моделлю впливу тиску на характеристики біполярних ІМС автомобільної промисловості, а також визначенням і перевіркою методів компенсації даного впливу. Розроблено процедуру аналізу впливу тиску на характеристики біполярних ІМС автомобільної промисловості. Отримані дані

доцільно використовувати про проектуванні біполярних ІМС з покращеними характеристиками.

Апробація результатів. Матеріали досліджень апробовано на міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “Електроніка – 2019”, м. Київ, квітень, 2019 р.

Публікації по роботі. За матеріалами дисертації опубліковано 1 друковану працю у науковому фаховому виданні:

- Зилевіч М.О. Вимірювальний стенд для дослідження впливу неоднорідної деформації на компоненти біполярних ІМС // Електронна та акустична інженерія. Том 2. – 2019. – № 1. – С. 21-25.

Отримані в даній дисертації результати можуть використовуватись про проектуванні та виготовленні біполярних ІМС з підвищеною стійкістю до впливу деламінаційних процесів.

Ключові слова: деформація, тиск, вольт-амперна характеристика, опір, деламінація, математична модель, компенсація, схемотехнічний аналіз.

ABSTRACT

The master's dissertation consists of 119 pages, which contains 31 pictures, 54 tables and 43 sources according to the list of references.

The relevant. Increasing the reliability of chips is an urgent task of the present. Since electronic devices are mostly composed of a set of microcircuits, their reliability is determined by the reliability of the chips used. One of the components of the reliability of chips is the constancy of their electrical characteristics under the influence of external factors such as temperature and humidity of the surrounding medium, mechanical deformations. Particular attention deserves the influence of mechanical deformation on electrical characteristics. Under such influence, direct deformation is understood, namely, the effect of pressure, longitudinal and transverse bends of the chip. In real conditions, such an effect is caused by the processes of procession in the thickness of the chassis chip. As a result of tampering, there is a heterogeneous deformation between the chip of the chip and its body. As a result, there is a pressure acting on the crystal chip and is sufficient to change the electrical characteristics of the latter.

The physics of the deformation effect on the characteristics of semiconductor silicon was studied both by domestic and foreign scientists. Having analyzed the scientific literature, it has been determined that the physics of deformation effects on semiconductor devices is completely theoretically described. Empirically, we obtain the basic formulas that describe the change in the characteristic of a semiconductor silicon under pressure. However, there are no mathematical models of pressure influence on electrical characteristics of semiconductor devices. There is also no information on how to compensate for such effects.

The conducted patent search showed the absence of patented mathematical models of pressure influence on the characteristics of semiconductor devices. Also, no patented methods of compensation for such influence were found.

Thus, to date, there is only a theoretical description of the physics of the process of pressure influence on the characteristics of the semiconductor components, as well as the basic formulas describing the change in the electrical characteristics of silicon under the influence of pressure. However, there is no mathematical model that describes the effect of pressure on the electrical characteristics of semiconductor devices, nor does it describe methods for compensating for such effects. It follows that this study is relevant, as there are still outstanding issues.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes. The dissertation was conducted in accordance with the scientific directions of the work of the department of designing of electronic computing equipment KPI them. Igor Sikorsky and the priority direction of development of science and technology of Ukraine "Information and communication technologies".

The goal is to increase the accuracy of mathematical models of active components of bipolar ICs by taking into account the influence of pressure on their electrical characteristics.

Tasks to achieve the goal in this thesis, the following tasks need to be addressed:

- to consider theoretical bases of the physics of the process of pressure exertion on the electrical characteristics of semiconductor devices;
- to analyze a method of experimental measurement of the change of electrical characteristics of silicon devices under pressure;
- to develop and test the adequacy of the mathematical model of such influence;
- to determine the influence of pressure on the change of electrical parameters of the bipolar ICs of the automobile industry;
- identify and test methods for compensating for such effects;
- develop a startup project for designing and manufacturing bipolar ICs with improved performance.

The object of the study is the process of the influence of the domainization on the characteristics of bipolar ICs.

The subject of the study is the models of pressure effects on the electrical characteristics of bipolar ICs and methods for compensating for such effects.

Research methods. To achieve the goal, methods of analysis and synthesis, deduction and mathematical modeling were used.

The scientific novelty of the research results obtained is as follows:

- it is found that the dependence of the band gap width on the pressure is nonlinear, the approximation model is proposed and its coefficients calculated. The error of the proposed model does not exceed 2%;

- it is found that the current gain of bipolar transistors does not depend on external pressure. This allows us to conclude that the drift mechanism of the transport of minority carriers through the base (determines the collector current) and the recombination mechanisms in the base (defining the current of the base) have the same nature of dependence on the width of the bandgap;

- developed models of pressure influence on semiconductor resistors, diodes and bipolar transistors, which can be used for solving problems of circuit engineering analysis and design of bipolar ICs, are proposed. The error of the proposed models does not exceed 2.5%.

The practical significance of the results obtained is determined by the created model of the influence of pressure on the characteristics of bipolar IMS automotive industry, as well as the definition and verification of methods of compensation for this effect. The procedure of analysis of the influence of pressure on the characteristics of bipolar IMS of automobile industry is developed. The obtained data should be used for the design of bipolar ICs with improved characteristics.

Approbation of results. Materials of research have been tested on international scientific and technical conferences of young scientists "Electronics - 2019", Kyiv, April, 2019.

Publications on work. On the materials of the dissertation published 1 printed work in the professional edition:

- Zilevich M.O. Measurement stand for the study of the influence of heterogeneous deformation on components of bipolar IMS // Electronic and acoustic engineering. Volume 2. - 2019. - No. 1. - P. 21-25.

The results obtained in this dissertation can be used for the design and manufacture of bipolar ICs with increased resistance to the effects of delamination processes.

Keywords: deformation, pressure, voltage-ampere characteristic, resistance, delamination, mathematical model, compensation, circuit engineering analysis.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ ВІД ВПЛИВУ МЕХАНІЧНОГО ТИСКУ....	7
1.1. Класифікація інтегральних мікросхем автомобільної промисловості .	7
1.2. Механічні впливи на мікросхеми автомобільної електроніки.....	9
1.3. Інтегральні резистори в біполярних мікросхемах	11
1.4. Інтегральні біполярні транзистори.....	14
1.5. Інтегральні діоди біполярних мікросхем	16
1.6. Фізика процесу впливу механічного тиску на електричні характеристики кремнію	18
1.7. Вплив однорідної деформації на напівпровідник	20
1.8. Вплив неоднорідної деформації на напівпровідник.....	21
1.9. Вплив деформації на напівпровідникові прилади	22
1.10. Зміна струму р-n переходу під тиском	23
1.11. Вплив тиску на діод.....	25
1.12. Вплив тиску на транзистор	27
1.13. Незворотні явища при деформації напівпровідника	28
1.14. Метод для вимірювання зміни електричних характеристик мікросхеми при дії деформації	30
1.15. Обґрунтування вибору методів дослідження	32
Висновки по розділу 1	38
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ТИСКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ	40
2.1. Математична модель впливу тиску на опір кремнієвого резистора....	40
2.2. Математична модель впливу тиску на ВАХ діода та транзистора.....	43
2.3. Експериментальне дослідження впливу тиску на ширину забороненої зони	45

2.4. Математична модель залежності ширини забороненої зони від тиску.....	50
2.5. Експериментальне дослідження впливу тиску на коефіцієнт підсилення β в біполярних транзисторах.....	55
2.6. Розрахунок параметрів за отриманими моделями.....	56
2.7. Перевірка адекватності розробленої моделі	64
Висновки по розділу 2	67
РОЗДІЛ 3. СИМУЛЯЦІЯ ВПЛИВУ ТИСКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ІМС АВТОМОБІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ ТАКОГО ВПЛИВУ	70
3.1. Процедура аналізу впливу тиску на вихідні характеристики ІМС.....	70
3.2. Вибір мікросхеми автомобільної електроніки та її вихідних параметрів для дослідження впливу тиску	73
3.3. Результати схемотехнічного аналізу	74
3.4. Методи компенсації впливу тиску на характеристики ІМС	81
Висновки по розділу 3	93
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	96
4.1. Опис ідеї проекту	96
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	97
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	98
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	104
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	106
Висновки по розділу 4	108
ВИСНОВКИ	110
Список використаної літератури	115
ДОДАТОК А. Копія публікації	119

ВСТУП

На сьогоднішній день усе більш важливу роль у повсякденному житті відіграють електронні пристрої. Кожного дня ми використовуємо мобільні телефони, персональні комп'ютери, різними “розумними” девайсами, тощо. Електроніка стала невід'ємною складовою в усіх сферах життя. Відповідно вимоги до таких пристроїв стають жорсткішими з кожним роком. Економія енергоспоживання, максимальна зручність у використанні, доступність, а головне надійність виходять на перший план при виборі та користуванні електроприладами. Надійність електронних пристроїв відіграє дуже важливу роль у всіх сферах використання, оскільки визначає гарантований час виконання поставних йому задач.

Актуальність. Збільшення надійності мікросхем є актуальним завданням сьогодення. Оскільки електронні пристрої здебільшого складаються з сукупності мікросхем, то їхня надійність визначається надійністю використовуваних мікросхем. Однією зі складових надійності мікросхем є сталість їх електричних характеристик при впливі зовнішніх факторів таких як температура і вологість довколишньої середовища, механічні деформації. Особливу увагу заслуговує вплив механічної деформації на електричні характеристики. Під таким впливом розуміють безпосередню деформацію, а саме вплив тиску, повздовжні та поперечні вигини мікросхеми. В реальних умовах такий вплив спричиняють деламінаційні процеси в товщі корпусу мікросхеми. Внаслідок деламінації виникає неоднорідна деформація між кристалом мікросхеми та її корпусом. Внаслідок чого виникає тиск, що діє на кристал мікросхеми і є достатнім для зміни електричних характеристик останнього.

Фізику процесу впливу деформації на характеристики напівпровідникового кремнію досліджували як вітчизняні так і закордонні науковці [1–6]. Вплив тиску на концентрацію носіїв у напівпровідниках досліджено в [7, 8]. Залежність провідності напівпровідників від дії тиску, а

також процеси генерації-рекомбінації досліджено в [9-11]. Вплив тиску на характеристики напівпровідникових приладів досліджено в [12-19].

Провівши аналіз наукової літератури визначено, що фізика впливу деформації на напівпровідникові прилади є повністю теоретично описаною. Емпіричним шляхом отримано основні формули, які описують зміну певної характеристики напівпровідникового кремнію під дією тиску. Проте не існує математичних моделей впливу тиску на електричні характеристики напівпровідникових приладів. А також відсутня інформація про методи компенсації такого впливу.

Проведений патентний пошук показав відсутність запатентованих математичних моделей впливу тиску на характеристики напівпровідникових приладів. Також не знайдено запатентованих методів компенсації такого впливу.

Таким чином, на сьогоднішній день існує лише теоретичне описання фізики процесу впливу тиску на характеристики напівпровідникових компонентів, а також виведено основні формули які описують зміну електричних характеристик кремнію під дією тиску. Проте не існує математичної моделі, яка б описувала вплив тиску на електричні характеристики напівпровідникових приладів, а також не описані методи компенсації такого впливу. З цього слідує, що дане дослідження є актуальним, оскільки досі є невирішені питання.

Мета. Підвищення точності математичних моделей активних компонентів біполярних ІМС шляхом врахування впливу тиску на їх електричні характеристики.

Задачі. Для досягнення поставленої мети в даній дисертації необхідно вирішити такі задачі:

- розглянути теоретичні основи фізики процесу впливу тиску на електричні характеристики напівпровідникових приладів;

- проаналізувати та обґрунтувати вибір методу експериментального вимірювання зміни електричних характеристик кремнієвих приладів під дією тиску;
- розробити та перевірити на адекватність математичну модель такого впливу;
- визначити вплив тиску на зміну електричних параметрів біполярних ІМС автомобільної промисловості;
- визначити та перевірити методи компенсації такого впливу;
- розробити стартап-проект по проектуванню і виготовленню біполярних ІМС з покращеними характеристиками.

Об'єктом дослідження є процес впливу делямінації на характеристики біполярних ІМС.

Предметом дослідження є моделі впливу тиску на електричні характеристики біполярних ІМС та методи компенсації такого впливу.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використовувались методи аналізу та синтезу, дедукції і математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в наступному:

- встановлено, що залежність ширини забороненої зони від тиску має нелінійний характер, розроблена її апроксимаційна модель та розраховані її коефіцієнти. Похибка запропонованої моделі не перевищує 2 %;
- встановлено, що коефіцієнт підсилення за струмом біполярних транзисторів не залежить від зовнішнього тиску. Це дозволяє зробити висновок про те, що дрейфовий механізм переносу неосновних носіїв через базу (визначає колекторний струм) і рекомбінаційні механізми в базі (визначає струм бази) мають однакову природу залежності від ширини забороненої зони;
- розроблено уточнені моделі впливу тиску на напівпровідникові резистори, діоди і біполярні транзистори, які можуть бути використані для

вирішення задач схемотехнічного аналізу і проектування біполярних ІМС. Похибка запропонованих моделей не перевищує 2,5 %.

Практичне значення отриманих результатів визначається створеною моделлю впливу тиску на характеристики біполярних ІМС автомобільної промисловості, а також визначенням і перевіркою методів компенсації даного впливу. Розроблено процедуру аналізу впливу тиску на характеристики біполярних ІМС автомобільної промисловості. Отримані дані доцільно використовувати при проектуванні біполярних ІМС з покращеними характеристиками.

Апробація результатів. Матеріали досліджень апробовано на міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “Електроніка – 2019”, м. Київ, квітень, 2019 р.

Публікації по роботі. За матеріалами дисертації опубліковано 1 друковану працю у науковому фаховому виданні:

- Зилевіч М.О. Вимірювальний стенд для дослідження впливу неоднорідної деформації на компоненти біполярних ІМС // Електронна та акустична інженерія. Том 2. – 2019. – № 1. – С. 21-25.

Структура дисертаційної роботи містить вступ, 4 розділи, висновки, перелік використаної літератури та додаток (копію публікації по роботі). В першому розділі розглянути теоретичні основи впливу тиску на характеристики напівпровідникового кремнію і компонентів біполярних ІМС. В другому розділі розроблено та перевірено на адекватність математичну модель впливу тиску на електричні характеристики компонентів біполярних ІМС. В третьому розділі проводилась схемотехнічний аналіз впливу тиску на біполярну ІМС автомобільної промисловості, розглянуто та перевірено методи компенсації даного тиску. В четвертому розділі розроблено стартап-проект.

Результати отримані в даній дисертації можуть використовуватись при проектуванні та виготовленні біполярних ІМС з підвищеною стійкістю до впливу деламінаційних процесів.

РОЗДІЛ 1. ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ ВІД ВПЛИВУ МЕХАНІЧНОГО ТИСКУ

Даний розділ присвячений визначенню характеру впливу тиску на інтегральні активні і пасивні елементи мікросхем автомобільної електроніки. Перш за все необхідно зрозуміти які бувають мікросхеми і чим вони відрізняються. Необхідно визначити існуючі механічні впливи, що діють на мікросхеми автомобільної електроніки.

Також потрібно мати уявлення про характеристику інтегральних транзисторів, резисторів і діодів, і визначити характер впливу на них механічної деформації. На основі отриманої інформації доцільно побудувати модель, за допомогою якої можна визначити вплив тиску на усю мікросхему, шляхом введення певних коефіцієнтів чутливості характеристик інтегральних елементів до тиску.

Вплив на електричні характеристики мікросхем описується тензорезистивним ефектом у напівпровідниках [20]. Це дає змогу визначати вплив тиску на мікросхему шляхом дослідження зміни електричних характеристик напівпровідника, з урахуванням пов'язаних структур у мікросхемах. Під пов'язаними структурами слід розуміти електричний зв'язок компонентів на кристалі, які утворюють певні блоки мікросхеми, такі як підсилювальні каскади, фільтрувальні каскади, блоки живлення та стабілізації напруги, тощо.

1.1. Класифікація інтегральних мікросхем автомобільної промисловості

Коли мова йде про мікросхеми автомобільної промисловості, то розглядаються спеціальні вузьконаправлені мікросхеми, які використовуються для роботи в електронних елементах автомобілів. Такі

мікросхеми відрізняються вимогами до виготовлення і якості. Класифікація таких мікросхем представлена у таблиці 1.1 [21].

Таблиця 1.1 – Класифікація мікросхем автомобільної промисловості

За технологією виготовлення	Напівпровідникові
	Плівкові
	Гібридні
За типом сигналу, що обробляється	Аналогові
	Цифрові
	Аналого-цифрові
За типом логіки	Уніполярна
	Біполярна

Напівпровідникова мікросхема – усі елементи та їх з’єднання виконані на одному напівпровідниковому кристалі.

Плівкова мікросхема – усі елементи та їх з’єднання виконані у вигляді плівок.

Гібридна мікросхема – резистори, конденсатори та провідникові з’єднання виконано у вигляді плівок, а інші елементи мікросхеми виконано дискретно на спільній підкладці.

На сьогоднішній день найрозповсюдженішими є напівпровідникові мікросхеми. Технологія виготовлення таких мікросхем дозволяє в одному виробничому циклі створювати цифрову логіку, а також пасивні елементи на одній підкладці.

Аналогові мікросхеми призначені для перетворення і обробки сигналів, що змінюються за законом неперервної функції. Незважаючи на широке застосування цифрової обробки інформації, аналогові мікросхеми використовуються як самостійно, так і в поєднанні з цифровими мікросхемами.

Цифрові мікросхеми призначені для перетворення і обробки сигналів, що змінюються за законом дискретної функції. В основі цифрових інтегральних мікросхем лежать транзисторні ключі, здатні перебувати в двох стійких станах: відкритому і закритому. Використання транзисторних ключів дає можливість створювати різні логічні, тригерні і інші інтегральні мікросхеми.

Біполярні мікросхеми виконані на основі біполярних транзисторів, що мають низьку чутливість до статичних розрядів. До недоліків відносять високе енергоспоживання, малу кількість логічних елементів, чутливість до напруги живлення і низьку завадостійкість.

Уніполярні мікросхеми складаються з комплементарних польових транзисторів зі структурою метал-окисел-напівпровідник. Комплементарними називають пару транзисторів, які ідентичні за абсолютними параметрами, але є протилежними один одному і доповнюють один одного. До переваг таких мікросхем відносять широкий діапазон допустимої напруги живлення, низьке енергоспоживання, високу стійкість до завад. Серед недоліків виділяють чутливість до статичних розрядів, меншу швидкодію порівняно з біполярними мікросхемами, залежність швидкодії від напруги живлення [22].

1.2. Механічні впливи на мікросхеми автомобільної електроніки

У процесі експлуатації на мікросхеми автомобільної промисловості можуть діяти такі механічні впливи як вібрація, удар, тиск. Такі впливи є причиною виникнення надмірно великих механічних напружень, деформацій і перенавантажень в інтегральних мікросхемах, що можуть бути причиною виходу з ладу останньої.

При вібраційному впливі на мікросхему йде мова про витримування мікросхемою механічного навантаження, що виникає при вібрації в автомобілі. Основним джерелом вібрації в автомобілях є безпосередньо

двигун внутрішнього згорання. Для такого типу двигуна характерними є вібрації від 60 Гц до 200 Гц в залежності від максимальних обертів двигуна. Також джерелом вібрації є підвіска автомобіля, частота такої вібрації складає від 2 Гц до 10 Гц в залежності від якості дорожнього покриття.

При впливі ударів йде мова про витримування мікросхемою перевантаження, що виникає при ударі. Причиною такого удару часто є зіткнення автомобілів з різними перешкодами. Наприклад, зіткнення автомобіля на швидкості 100 км/год з нерухомим жорстко закріпленим об'єктом складає 200 G.

Коли йдеться про тиск, то безпосередньо в автомобільній промисловості на мікросхему він не діє. Але під впливом температурного режиму і вологості середовища з часом у мікросхемі починаються відбуватись незворотні процеси деламінації.

Деламінація – процес розшарування мікросхеми в корпусі внаслідок впливу довколишніх умов експлуатації і дефектів корпусування мікросхеми. Зазвичай розшарування характерне для підкладки мікросхеми, внаслідок цього виникають локальні неоднорідні деформації, що спричиняють локальний тиск на мікросхему. Приклад такого процесу зображено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Деламінація мікросхеми в корпусі

Такий тиск є причиною зміни характеристик напівпровідникових структур мікросхеми, які знаходяться в площі дії локальної деформації [23].

Усі перераховані вище впливи спричиняють однорідний або неоднорідний тиск на кристал мікросхеми. Причому найімовірнішим є тиск, який виникає внаслідок деламінаційних процесів, оскільки вібрація в

автомобілі не викликає зміни електричних характеристик в мікросхемі. А перевантаження, що з'являється через зіткнення автомобіля спричиняє руйнування усього автомобіля. Деламінаційні процеси виникають в мікросхемах з плином часу і тиск, який внаслідок цього діятиме на кристал, буде постійно діяти і зміна характеристик останнього буде постійна.

Такий деформаційний вплив тиску можна дослідити шляхом прикладання до транзистору, діоду чи резистору тиску за допомогою голки. На основі зміни даних при такому впливі можна побудувати математичну модель зміни характеристик напівпровідникового елемента і на основі цієї моделі дослідити вплив тиску на мікросхему.

У дослідженні особлива увага звертається саме на вплив деформацій на мікросхеми біполярної структури, оскільки вони є більш чутливими до впливу деформації. Така залежність є однією зі складових, що визначає надійність і правильність роботи мікросхеми. Під правильністю слід розуміти відтворюваність електричних характеристик, що вказані у специфікації конкретної мікросхеми.

1.3. Інтегральні резистори в біполярних мікросхемах

Резистори в інтегральних мікросхемах поділяються на наступні типи [24]:

- Дифузійні.
- Пінч.
- Епітаксіальні.
- Іонно-леговані.
- Тонкоплівкові.

Дифузійні формуються в емітерному або базовому дифузійному шарі транзисторної структури в єдиному технологічному процесі. Опір тіла дифузійного резистора є об'ємний опір ділянки дифузійного шару,

обмеженого р-п переходом. Опір визначається геометричними розмірами резистивної області і характером розподілу домішок по глибині. При створенні ІМ параметри дифузійних шарів оптимізуються з метою отримання найкращих характеристик n-p-n транзистора, тому параметри дифузійних резисторів не можна поліпшити за рахунок технологічних режимів, а лише – за рахунок вибору конфігурації і геометричних розмірів. Похибка значень опорів дифузійних резисторів становить до 20% і обернено пропорційний ширині резистора. Відхилення номіналів резисторів, розташованих на одному кристалі, через технологічну похибку має один знак, тому відношення опорів зберігається з високою точністю.

Низькоомні резистори (від 2 Ом до 100 Ом) виконуються на основі емітерної області (оскільки вона сильно легована і її питомий поверхневий опір низький), а на основі базової області виготовляються високоомні резистори від 0,1 КОм до 20 КОм. Приклад такого резистору зображено на рисунку 1.2.

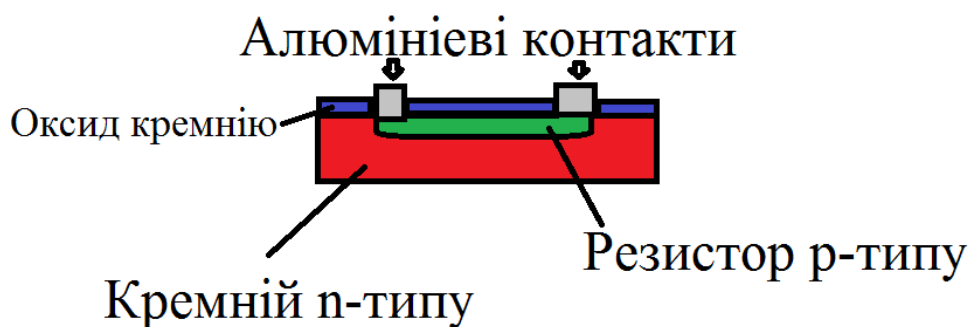


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення інтегрального дифузійного резистора

Пінч-резистори застосовуються за необхідності створення високоомних резисторів. Вони формуються на основі донної слабо легованої області бази або колекторного шару, де високий питомий опір і мала площа перетину. Максимальний опір таких резисторів від 200 КОм до 300. Такі резистори мають велике відхилення номіналів (до 50%).

Епітаксіальні резистори. З трьох областей транзистора колектор має найбільший питомий опір на квадрат, тому що він слабо легований. На відміну від дифузійного епітаксіальний шар легований однорідно, тому його провідність постійна по всьому перетину.

Такі резистори формуються розділовою дифузією, тому мають специфічний перетин. Оскільки ця дифузія довготривала, то точне регулювання її розмірів ускладнено, також характерна велика бічна дифузія, тому розкид номіналів таких резисторів значний. Крім цього, ці резистори займають велику площу, що адже площа розділової дифузії – велика.

Іонно-леговані резистори дуже схожі на структуру дифузійних резисторів, але глибина залягання іонно-легованих шарів всього від 0,1 мкм до 0,3 мкм. Іонна імплантація дозволяє забезпечити малу концентрацію легуючих домішок в шарі. При відповідному виборі дози легування і параметрів відпалу можуть бути досягнуті номінали опорів в сотні КОм з допуском $\pm 10\%$.

Тонкоплівкові резистори формуються на поверхні шару захисного діелектрика, що являють собою смужку високоомного матеріалу, зазвичай полікристалічного кремнію або певного металу. Характеризуються високою точністю виготовлення та високою граничною частотою.

Вибір конструкції резистора ґрунтується, перш за все, на прагненні отримати резистор необхідного номіналу при малій площі, яку він займатиме. При цьому необхідно врахувати обмеження по температурному коефіцієнту опору, пробивну напругу, та інших характеристиках. Практика проектування рекомендує використовувати дифузійні резистори на основі емітерного шару для низьковольтних резисторів з опором не більше 100 Ом, на основі базового шару – резисторів з опором до 60 КОм, епітаксіальні резистори – для високовольтних опорів від 150 КОм до 200 КОм. Іонно-леговані резистори доцільно застосовувати в разі підвищених вимог до точності виготовлення [25].

1.4. Інтегральні біполярні транзистори

Основним елементом у біполярних мікросхемах є біполярний n-p-n транзистор. Він володіє кращими характеристиками, ніж транзистор p-n-p типу, а техніка виготовлення більш проста. Крім цього основну роль в електричних процесах в транзисторах типу n-p-n грають електрони, а в транзисторах типу p-n-p – дірки. Електрони мають рухливість в два-три рази більшу, ніж дірки, тому швидкодія транзисторів типу n-p-n вище.

Технологічний процес виготовлення біполярних інтегральних схем відпрацьовується так, щоб параметри n-p-n транзистора були оптимальними, а інші елементи виготовлені з технічного оптимуму для даного транзистора.

Усі різновиди біполярних інтегральних транзисторів створюються за однаковим принципом. Спочатку формується колекторна область n типу, потім акцепторною домішкою базова р область, після чого донорна домішка n утворює емітерну область. Інтегральні біполярні транзистори виготовляються за планарною або планарно-епітаксialною технологією. Методом дифузії в кристалі створюються області колектора, бази і емітера. Структура транзистора поглиблюється в кристал не більше, ніж на 15 мкм, а лінійні розміри транзистора на поверхні не перевищують декількох десятків мікрометрів.

Внутрішній (прихований) шар з підвищеною концентрацією домішок n^+ в колекторі слугує для зменшення опору і зменшення втрат потужності в області колектора. Але у колекторного переходу область колектора повинна мати знижену концентрацію домішок, щоб перехід мав велику товщину. Тоді ємність у нього буде менша, а напруга пробою вище. Область емітера також часто роблять типу n^+ для зменшення опору і збільшення інжекції. Зверху на транзисторі створюється захисний шар оксиду SiO_2 [1]. Приклад такого транзистора зображено на рисунку 1.3.

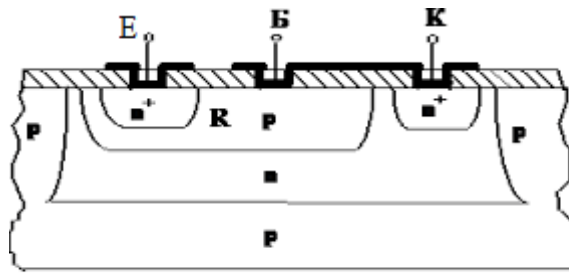


Рисунок 1.3 – Інтегральний біполярний транзистор n-p-n типу

У біполярних транзисторах, виготовлених за планарною технологією основний струм через емітерний і колекторний переходи протікає вертикально (якщо сама мікросхема розташована горизонтально). Такі транзистори називають вертикальними, робляться переважно типу n-p-n.

Латеральний (горизонтальний) p-n-p транзистор. Транзистор p-n-p використовується як навантажувальний для n-p-n транзисторів. Їх виготовляють одночасно з транзисторами типу n⁺-p-n за звичайною технологією. Емітерний і колекторні шари виходять на етапі базової дифузії. Базова область формується на основі епітаксiального шару з підлегнуванням контактної області під час емітерної дифузії [2].

Багатоемітерні транзистори можна відмикати подачею імпульсу прямої напруги на будь-який з емітерних переходів. До кожного емітера підключається своє джерело імпульсу. При цьому важливо, щоб такий імпульс напруги не діяв на інші джерела вхідних імпульсів, так як емітерні переходи, які не працюють в даний момент, будуть перебувати під зворотною напругою.

Аналогічно до багатоемітерних транзисторів існують багатоколекторні. За структурою такі транзистори схожі на багато колекторні, але використовуються в іншому режимі. По суті багатоколекторний транзистор – це багатоемітерний транзистор, який використовується в інверсивному режимі. Основним завданням таких транзисторів є збільшення коефіцієнта передачі струму від спільного емітера до кожного з колекторів [3].

Транзистор з бар'єром Шотткі – це біполярний транзистор, у якого колекторний перехід шунтований діодом Шотткі. Діод Шотткі має контакт металу з напівпровідником і характеризується випрямляючими властивостями. Його перевага це відсутність дифузійної ємності, і за рахунок цього робочі частоти діода досягають 15 ГГц. При роботі такого транзистора в режимі ключа значно підвищується швидкодія. Транзистор швидше переходить з відкритого стану в закритий [4].

1.5. Інтегральні діоди біполярних мікросхем

Будь-який з р-п переходів транзисторної структури може бути використаний для формування діодів. Зазвичай використовуються переходи база-емітер і база-колектор. Існує п'ять можливих варіантів використання р-п переходів в якості діода:

- на основі переходу база-емітер з колектором, закороченим на базу (БК-Е);
- на основі переходу колектор-база з емітером, закороченим на базу (БЕ-К);
- з використанням емітерного і колекторного переходів, коли емітерний і колекторні області з'єднані (Б-ЕК);
- на основі переходу база-емітер, з розімкненим ланцюгом колектора (Б-Е);
- на основі переходу база-колектор з розімкненим ланцюгом емітера (Б-К).

Основні параметри цих типів включення представлені в таблиці 1.2. З цієї таблиці видно, що пробивна напруга $U_{пр}$ більше у тих варіантів, у яких використовується колекторний перехід, а зворотні струми $I_{зв}$ менше у тих варіантів, у яких використовується тільки емітерний перехід. Ємність діода між катодом і анодом C_d у варіантів з найбільшою площею переходу (тобто

для включення Б-ЕК) максимальна. Паразитна ємність на підкладку C_o мінімальна у варіанту Б-Е. Час відновлення зворотного струму t_b , що характеризує час перемикання діода, мінімально для варіанту БК-Е, так як у цього варіанту накопичується заряд тільки в базі [5].

Таблиця 1.2 – Параметри інтегральних діодів

Параметри	Тип діода				
	Б-Е	Б-К	БЕ-К	БК-Е	Б-ЕК
$U_{пр}, В$	7-8	40-50	40-50	7-8	7-8
$I_{зв}, нА$	0,5-1	15-30	15-30	0,5-1	20-40
$C_d, пФ$	0,5	0,7	0,7	0,5	1,2
$C_o, пФ$	1,2	3	3	3	3
$t_b, нс$	50	75	50	10	100

Оптимальними варіантами мікросхем для діода є БК-Е і Б-Е. Пробивна напруга для такого типу включення становить від 7 В до 8 В, що цілком достатньо для використання цих варіантів у низьковольтних мікросхемах.

Діоди Шотткі виникають у місці контакту металу з напівпровідником при певних умовах. Вони створюються шляхом нанесення металу безпосередньо на кремній, легований донорною домішкою. При рівномірно легуваних епітаксціальних шарах ступінь легування повинна бути досить низькою, інакше бар'єр виявиться проникним для тунелюючих електронів. Висоту бар'єру можна змінити, застосовуючи різні метали і проводячи під діодом n^+ імплантацію, що знизить висоту бар'єру.

1.6. Фізика процесу впливу механічного тиску на електричні характеристики кремнію

Як зазначалось вище, фізика даного процесу повністю описується явищем тензорезистивного ефекту у напівпровідниках. Але спочатку введемо деяку інформацію про будову напівпровідникового кремнію.

Кристалічна решітка напівпровідникового кремнію володіє кубічною симетрією. Якщо напівпровідник піддавати дії довільної деформації, то його симетрія в загальному випадку буде знижуватись. Це спричинить зміщення енергетичних рівнів і перерозподіл носіїв струму між ними, що в свою чергу призведе до зміни електричних властивостей напівпровідника [6]. В якості основних електрофізичних параметрів, що змінюються під впливом тиску, виступають зміщення енергетичних рівнів напівпровідника, зміна ефективних мас і рухливості носіїв струму. При всебічному стиску ширина забороненої зони в кремнії зменшується.

Ефективна маса не залежить від абсолютної величини деформації, а визначається тільки її напрямком щодо кристалографічних осей.

Під дією деформації ширина забороненої зони змінюється, оскільки як дно зони провідності, так і вершина валентної зони зміщуються при деформації напівпровідника.

Однією з величин, що визначають чутливість напівпровідникових приладів до деформації, є концентрація носіїв струму i , зокрема, концентрація неосновних носіїв. У деформованому напівпровіднику перерозподіл електронів між рівнями призводить до зміни концентрації носіїв струму, що спричиняє зміну електричних характеристик електронного компоненту, на який діє деформація.

Якщо концентрація донорів досить велика, то деформація має незначний вплив на концентрацію основних носіїв, проте концентрація неосновних носіїв може змінитися дуже сильно. Якщо ширина забороненої зони зменшується під дією деформації, то концентрація неосновних носіїв

струму зростає і може зрівнятися за величиною з концентрацією основних носіїв.

Важливу роль в провідності напівпровідників грають домішкові рівні, що знаходяться в забороненій зоні. Причиною появи таких рівнів можуть бути як атоми домішок в напівпровіднику, так і різні дефекти, дислокації, порушення структури, дефекти на поверхні напівпровідника і т. п. Деформація напівпровідника приводить до зміщення домішкових рівнів.

Зміна структури зон при деформації призводить до зміни енергії і хвильових функцій домішкового центра, до того ж характер цих змін визначається типом відповідної зони. Якщо зона невироджена і проста, то зсув краю зони при деформації призводить лише до відповідного зсуву всіх станів домішкового центра. Енергія іонізації при цьому не змінюється. У разі багатодолинної зонної структури домішковий рівень вироджується так само, як і край зони. Деформація знімає виродження дна зони, і в тій же мірі вона знімає виродження домішкового рівня.

Перерозподіл носіїв струму між зміщеними рівнями в деформованому напівпровіднику і зміщення домішкових центрів, які є центрами рекомбінації, призводить до зміни рухливості і часу життя неосновних носіїв струму. Це призводить до зміни внеску цих двох компонентів у загальну рухливість по відношенню до недеформованому матеріалу. Зсув домішкових рівнів під дією деформації призводить до впливу тиску на процеси генерації-рекомбінації носіїв струму в напівпровідниках. Зміщення енергетичних рівнів по-різному впливатиме на час життя носіїв струму в залежності від ступеня легування напівпровідника. Якщо напівпровідник сильно легований, то тиск практично не впливає на тривалість життя носіїв заряду. Час життя може змінюватися при деформації тільки в тому випадку, якщо деформація призводить до виникнення нових центрів рекомбінації. Зсув же енергетичних рівнів не впливатиме на тривалість життя носіїв заряду.

В загальному випадку, зміна часу життя під тиском визначається швидкістю зміни відстані між рівнем пастки і рівнем Фермі. Залежність часу

життя від деформації тим більше, чим менше ступінь легування напівпровідника. У напівпровідниках з великою концентрацією дефектів у домішках час життя практично не залежить від тиску, якщо тиск не призводить до створення нових центрів. Але більшість кремнієвих мікросхем мають досить високу ступінь легування, і тому зміни часу життя носіїв струму в них невеликі.

1.7. Вплив однорідної деформації на напівпровідник

Однорідними деформаціями називаються такі, при яких компоненти тензора деформації постійні уздовж всього обсягу тіла. Основні види однорідних деформацій, яким піддається кристал є всебічне стиснення, просте одновісне стиснення і розтягнення по різних осях, одностороннє стиснення і розтягнення по різних осях і чистий зсув [7].

Великі зміни концентрацій носіїв струму відбуваються при тисках 10^9 Па, що важко реалізувати по всій площині кристала. При всебічному стиску такі значення досягаються при використанні спеціальної техніки високих тисків, а при створенні одновісних деформацій досяжна межа зазвичай обмежується крихкістю кристалів, які не витримують великого тиску. Зміну концентрації основних і неосновних носіїв зображено на рисунку 1.4.

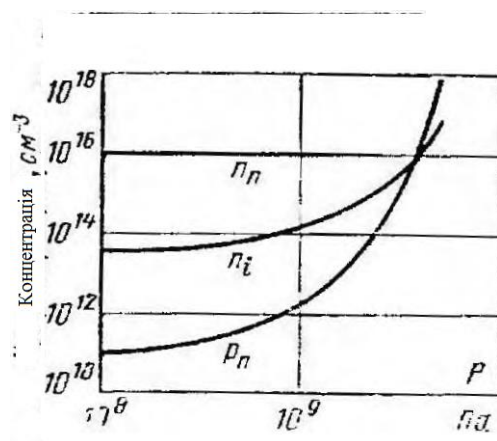


Рисунок 1.4 – Зміна концентрації носіїв заряду під впливом тиску

Для експериментальних досліджень використовуються спеціальні способи концентрації напружень, наприклад тиск голкою на поверхню напівпровідника, різні пропили і канавки на кристалі тощо. При цьому виникають неоднорідні деформації. Такі неоднорідні деформації дозволяють створити великі механічні напруги і деформації в малому обсязі напівпровідника.

1.8. Вплив неоднорідної деформації на напівпровідник

При практичному дослідженні деформаційних ефектів у напівпровідниках часто застосовуються неоднорідні деформації. Це деформації, які виникають локально, в різних точках зразка при тиску на його поверхню індентером, вигині, наявності спеціальних кутів, пропилів і канавок, що призводять до концентрації напружень. Також така деформація може виникнути у разі деламінаційних процесів, що спричиняє локальні напруження в корпусі мікросхеми.

При неоднорідних деформаціях зазвичай відбувається концентрація напружень в малому обсязі, а це дозволяє отримувати локально великі рівні деформації, а отже і великі деформаційні ефекти.

Неоднорідна деформація виникає тоді, коли сила, що викликає деформацію, діє в якійсь малій області тіла або ж на деякій частині його поверхні. Найбільш важливим з практичної точки зору є випадок, коли деформація викликається силою, прикладеною до поверхні тіла. Якщо тиск діє на обмежену частину поверхні тіла, то розподіл деформацій всередині тіла має істотно неоднорідний характер. Деформації великі в області під індентером і досить швидко спадають з віддаленням від цієї області. Різні компоненти тензора деформації мають різний розподіл в просторі безпосередньо під областю, підданою тиску.

В кремнії при неоднорідній деформації, ефективна ширина забороненої зони зменшується. При цьому ті рівні, які були нижні в недеформованому

кристалі, лишилися нижніми і при деформації, але розщеплення рівнів призводить до того, що тільки частина з них приймає участь у провідності. Під дією деформацією один з рівнів через розщеплення може виявитися нижнім вже при невеликих значеннях деформації, цілком досяжних при тиску голкою. Тоді ефективна ширина забороненої зони буде спочатку зростати, а потім після переходу через максимум почне зменшуватися з ростом сили. При припиненні дії деформації на напівпровідник електричні характеристики повертаються в норму, за виключенням випадків, коли деформація призвела до незворотних змін в структурі кремнію.

1.9. Вплив деформації на напівпровідникові прилади

При дії тиску змінюється вольт-амперна характеристика р-n переходу діодів і транзисторів, їх ємності і напруга пробою, коефіцієнт підсилення (для транзисторів), довжина хвилі світла, що випромінює напівпровідниковий лазер, тощо [8].

Дослідження цих явищ є доцільним оскільки, зміна характеристик напівпровідникових приладів може використовуватися для індикації тиску та інших механічних величин в датчиках тиску, приймачах звуку і тому подібних приладах. Також схожі явища є цікавими з точки зору надійності роботи напівпровідникових приладів, так як деформації, що виникають в приладі з тих чи інших причин, призводять до порушень в його роботі. Великий експериментальний матеріал, накопичений в різних лабораторіях світу, дозволяє зробити висновок, що основними чинниками, які зумовлюють зміну характеристик приладів під тиском, є зміщення енергетичних рівнів напівпровідника, а також зміна ефективних мас, часу життя і рухливості носіїв струму. Разом з тим слід зазначити, що існує можливість виникнення під тиском оборотних центрів рекомбінації носіїв струму, як однієї з причин високої чутливості напівпровідникових структур до тиску [9]. При деформації напівпровідника виникає дислокація, яка може стати центром

рекомбінації, але в такому випадку зміна струму під тиском у напівпровіднику буде мати необоротний характер і після припинення дії деформації струм не буде повертатись до свого попереднього значення. Виникнення центрів рекомбінації може призводити лише до необоротних явищ, а усі оборотні явища описуються зміщенням енергетичних рівнів, зміною рухомості і інших характеристик напівпровідника.

Для визначення характеру змін, які вносить тиск в роботу напівпровідникових приладів, можна розрізняти два діапазони тисків: великий тиск, при яких зміщення енергетичних і змінення ширини забороненої зони значно перевищує теплову енергію, і малий тиск, при якому зміна ширини забороненої зони менша, ніж теплова енергія.

При великому тиску зони розщеплюються, електрони і дірки перетікають на ті рівні, які мають найменшу енергію, тоді як інші рівні збіднюються носіями і практично не беруть участі в процесі провідності. В цьому випадку головним фактором, що обумовлює більшість ефектів у напівпровідникових структурах, є зміна ширини забороненої зони напівпровідника під тиском.

Якщо тиск малий, то в провідності приймають участь усі рівні. В цьому випадку важливий вклад в зміну струму вносить залежність ефективних мас, часу життя і рухомості носіїв заряду від тиску. У деяких випадках помітний внесок може давати зміщення домішкових рівнів під дією тиску, якщо рекомбінація і генерація носіїв струму на цих рівнях або тунелювання через них істотно впливає на струм.

1.10. Зміна струму р-n переходу під тиском

Безпосередньо струм визначається дифузією неосновних носіїв заряду через р-n перехід. Зсув енергетичних рівнів і зміна ширини забороненої зони напівпровідника під тиском призводить до зміни концентрації неосновних носіїв струму, а отже і до зміни струму під тиском. Концентрація основних

носіїв струму визначається числом іонізованих атомів домішки (або ж некомпенсованими атомами домішки) і тому слабо чутлива до тиску.

Струм насичення р-п переходу визначається концентрацією неосновних носіїв струму і тому при сильних деформаціях може змінюватись. Відповідно до цього чутливими до тиску є і інші напівпровідникові структури, струм яких залежить від концентрації неосновних носіїв, наприклад транзистори. Зміна рухливості і часу життя носіїв струму під тиском також робить вклад у зміну струму р-п переходу. Характерним є те, що зміна струму під тиском більша тоді, коли неосновними носіями струму є дірки. При сильній деформації щільність струму змінюється внаслідок зменшення ширини забороненої зони, відповідно при збільшенні ширини забороненої зони струм зменшується. Вплив інших факторів, таких як рухомість і час життя, значно менше. Якщо деформація мала, то зміна струму визначається зміною рухомості і часом життя носіїв струму.

Якщо процеси генерації-рекомбінації носіїв в самому р-п переході вносять значний внесок в струм діода [10]. Тоді разом з дифузійним струмом, через р-п перехід тече так званий струм генерації-рекомбінації. У кремнії струм генерації-рекомбінації може бути більше, ніж дифузний струм. Поява струмів рекомбінації призводить до зміни вольт-амперної характеристики діода і на зворотній гілці з'являється залежність струму від напруги. Струм генерації-рекомбінації експоненціально залежить від положення енергетичних рівнів і від ширини забороненої зони, а отже змінюється під дією тиску. Якщо в недеформованому переході дифузійний і рекомбінаційний струми були величинами одного порядку, то при дії тиску дифузійна складова струму може стати переважаючою. Це призведе до зміни нахилу вольт-амперної характеристики.

Струм діода без тиску чисто рекомбінаційний, але при збільшенні тиску нахил кривої починає зростати, що пов'язано з ростом вкладу дифузійного струму. При досить великому тиску дифузний струм стає

переважаючим. При зворотних зсувах зазвичай переважає струм, генерації-рекомбінації.

На практиці часто деформації створюються лише на частині р-п переходу. Так буває при тиску на перехід голкою, кулькою або іншим індентером. При цьому в області, що знаходиться безпосередньо під індентером, деформації великі, а отже, великі зміни щільності струму, а поза областю прикладання сили деформацією можна знехтувати. Якщо зсув рівнів призводить до збільшення ширини забороненої зони, то струм р-п переходу зменшується зі збільшенням тиску. Якщо ширина забороненої зони зменшується зі зростанням тиску, то струм зростає в області дії сили і може стати значно більшим, ніж струм через усю іншу площу діода. При цьому зміна повного струму під тиском може виявитися значною, незважаючи на те що тиск чиниться лише на малій частині площі діода.

При всебічному стиску струм р-п переходів з кремнію збільшується зі зростанням тиску [11]. Особливо великі зміни струму р-п переходу спостерігаються при тиску гострою голкою. Тиск таким способом спричиняє сильні локальні деформації і зміщення рівнів значне. При неоднорідному тиску найбільші зміни струму помітні тоді, коли р-п перехід знаходиться в області максимальних деформацій. Зміна струму при тиску голкою чутлива до глибини залягання р-п переходу під поверхнею, на яку проводиться тиск.

1.11. Вплив тиску на діод

Діоди з бар'єром Шотткі чутливі до тиску і в ряді випадків їх чутливість виявляється помітно вище, ніж чутливість р-п переходів [12].

Висота потенційного бар'єру залежить від поверхневого стану на межі поділу, через дефекти домішок і від товщини діелектричної плівки, яка завжди утворюється на поверхні напівпровідника. Для напівпровідників з помірним ступенем легування основним механізмом, що визначає струм через діод з бар'єром Шотткі є термоіонна емісія носіїв струму через бар'єр

[13]. Цей струм переноситься електронами з енергією, що перевищує висоту потенційного бар'єру.

Зсув енергетичних рівнів напівпровідника при деформації призводить до зміни висоти потенціального бар'єру. При дії тиску змінюються ширина забороненої зони, положення рівня Фермі і поверхневого рівня. У загальному випадку вважається, що висота потенційного бар'єру лінійно залежить від тиску.

Можлива й інша характеристика деформаційного ефекту діода, а саме змінено напруги на діоді при фіксованому значенні струму. При дії тиску ефект тим більше, чим менше радіус діода Шотткі [14]. Дослідження показали, що вольт-амперні характеристики діодів з бар'єром Шотткі змінюються під тиском аналогічно характеристикам p-n переходів, та навіть перевищує чутливість останнього [15].

До цих пір мова йшла про діоди з бар'єром Шотткі, які зроблені на базі напівпровідників з низьким ступенем легування. Але в більшості випадків використовуються діоди виготовлені з напівпровідника з високим ступенем легування. Ширина бар'єру в таких діодах набагато менше, ніж в звичайних, і за певних умов електрони з дна зони провідності можуть проходити крізь бар'єр за допомогою тунельного ефекту. При високих концентраціях легуючої домішки в напівпровіднику і при низьких температурах бар'єр стає прозорим для електронів, що знаходяться на дні зони провідності. Зі збільшенням тиску висота бар'єру зменшується, прозорість бар'єру збільшується і тунельний струм зростає. Чутливість струму до тиску при цьому також зростає.

При будь-якій фіксованій температурі висота бар'єру така, що робоча точка діода потрапляє в область чистої термоелектронної емісії, то докладаючи тиск, що призведе до зниження бар'єру, можливий перехід робочої точки в проміжну область, або навіть в область, де переважає тунельний струм. Якщо тиск призводить до зростання висоти бар'єру, то можливий зворотний перехід від тунельного струму до термоіонного.

Чутливість до тиску тунельного струму в поверхнево-бар'єрних діодах більше, ніж чутливість термоіонного струму.

У тунельному діоді під дією тиску вольт-амперна характеристика тунельного діода змінюється, причому тунельний і надлишковий струми по-різному залежать від тиску. Збільшення ширини забороненої зони при деформації призводить до зменшення тунельного струму, а зменшення зони до збільшення струму [16].

Надлишковий струм в загальному випадку для всіх напівпровідникових матеріалів збільшується при дії тиску. Під дією тиску виникають оборотні дефекти, які призводять до появ нових глибоких рівнів в забороненій зоні, що завжди спричиняє зростання струму. Механізм залежності надлишкового струму від тиску пояснюється зміщенням домішкових рівнів в забороненій зоні під дією деформації. Якщо при деформації можуть виникати певні додаткові стани в забороненій зоні, то це теж призведе до зростання надлишкового струму оскільки надлишковий струм прямо пропорційний до концентрації домішкових рівнів.

1.12. Вплив тиску на транзистор

Зсув енергетичних рівнів під тиском і пов'язана з цим зміна концентрації неосновних носіїв струму призводить до залежності від тиску електричних характеристик транзисторів.

Під дією тиску в базі транзистора змінюється концентрація носіїв струму. Поки тиск невеликий і в провідності беруть участь всі енергетичні мінімуми, під тиском змінюється рухливість носіїв, отже і змінюється кількість дірок. При збільшенні тиску рухливість перестає змінюватися і всі зміни колекторного струму відбуваються через залежність кількості носіїв заряду від тиску. Якщо напруга на емітері залишається постійною, а ширина забороненої під тиском зменшується, колекторний струм збільшується зі

зростанням тиску [17]. В такому випадку поведінка транзистора під тиском аналогічна поведінці р-n переходу.

Якщо колекторний струм під тиском змінюється так само, як струм бази, то коефіцієнт посилення залишається незмінним. Якщо тиск на транзистор проводиться голкою, то в поведінці транзистора спостерігаються деякі особливості. Під тиском ширина забороненої зони зменшується, а струми колектора і бази збільшуються, то зростання струму колектора з тиском відбуватиметься повільніше, ніж зростання струму бази, що призведе до зменшення з тиском коефіцієнта підсилення. В загальному випадку залежності від тиску для транзистора ті ж, що і для одиничного р-n переходу.

У транзисторах, виготовлених за пленарною технологією, особливо важливу роль відіграє вибір місця тиску голкою на поверхню напівпровідника. Найбільші зміни струму під тиском виникають тоді, коли голка тисне на край переходу, що виходить на поверхню напівпровідника.

1.13. Незворотні явища при деформації напівпровідника

Коли деформації, створювані в напівпровіднику великі і є велика концентрація напруження в малому обсязі, то можлива поява незворотних змін електричних характеристик. Незворотні явища полягають в тому, що при знятті навантаження вольт-амперна характеристика не повертається до початкового стану. Значення струму при зростанні сили не збігаються зі значеннями при її зменшенні. Такі явища виникають тоді, коли механічні напруги виявляються близькими до межі пружності.

При тиску голкою на поверхню напівпровідника механічні напруги в області безпосередньо під голкою досягають величин приблизно 10^9 Па. Ці напруги близькі до межі пружності. При однорідних деформаціях таких великих напруг, як правило, досягти не вдається, оскільки кристал руйнується раніше через наявність в них мікротріщин, дислокацій і дефектів обробки. При концентрації напружень, наприклад при тиску голкою, досяжні

механічні напруги, що перевищують макроскопічну межу пружності без порушення цілісності всього кристала.

Існує поняття критичної сили, яка визначається наступним чином: при дії на напівпровідник сили зміна електричних характеристик напівпровідника повністю оборотна, а при дії критичної сили з'являються залишкові зміни вольт-амперних характеристик. Значення критичної сили залежить від матеріалу напівпровідника, радіуси кривизни голки, від глиби залягання переходу під поверхнею напівпровідника, а також від попередньої обробки цієї поверхні [18]. Незворотні явища пов'язані з появою в кристалі під тиском дислокацій та інших дефектів решітки, які, з одного боку, є центрами рекомбінації, а з іншого – створюють додаткові внутрішні неконтрольовані напруженості. Виникнення дислокації при тиску голкою призводить до спотворення зонної структури і до появи в забороненій зоні додаткових рівнів, на яких відбувається рекомбінація носіїв струму. Це викликає збільшення швидкості рекомбінації і зменшення часу життя неосновних носіїв, що призводить до зростання рекомбінаційного струму.

Залежність збільшення струму від тиску для кремнієвого p-n переходу така, що зі збільшенням сили струм зростає. При збільшенні сили до критичного значення відбувається різке збільшення струму. Зворотній струм при критичному значенні сили спочатку збільшується, а потім стабілізується на новому рівні, відмінному від початкового для недеформованого напівпровідника. Поведінка прямого струму при переході через критичне значення сили дещо відрізняється від поведінки зворотного струму. Після переходу через критичне значення прямий струм зменшується, а потім стає нестійким. Досягнення критичного значення сили, що діє на кремнієвий p-n перехід спричиняє перевищення струму незворотнім чином.

При дії на напівпровідникові мікросхеми великих механічних перевантажень часто відбувається порушення роботи останніх, яке призводить до різкої зміни струму або напруги, до короточасного обриву певно контакту або ж до повного виходу з ладу мікросхеми. Це як з

порушенням цілісності кристалу, так і з електричними або пластичними деформаціями кристалу. Деформаційні ефекти в напівпровідниках приводять до того, що через малу площу певної ділянки протікає струм великої щільності, що призводить до локального перегріву напівпровідника і до зміни його властивостей. Короткочасні навантаження, що діють на мікросхему, викликають відхилення електричних характеристик, причому ці відхилення можуть істотно перевищити допуски параметрів. Особливо схильні до деформації місця контакту кристалу з выводами мікросхеми [19].

1.14. Метод для вимірювання зміни електричних характеристик мікросхеми при дії деформації

Перш за все, при виборі методу вимірювання, треба визначити спосіб деформування кристалу. З інформації наведеної вище зрозуміло, що найоптимальнішим методом є тиск голкою на певну область поверхні кристалу. Даний метод дозволяє дослідити вплив локальної деформації на електронні характеристики мікросхеми. Він дає можливість створити таке значення тиску, при якому зміни характеристик стають помітними і не призводять до руйнування усього кристалу, як при однорідній деформації. Також характерним є те, що сам до неоднорідної деформації визначається найбільша чутливість напівпровідникових виробів. Така деформація ймовірна в реальних умовах внаслідок деламінаційних процесів, деградації контактів кристалу з выводами корпусу, дефектів кристалу та інших процесів, що створюють механічну локальну деформацію в мікросхемі [26]. З плином часу і в залежності від умов використання такі процеси відбуваються в усіх напівпровідникових мікросхемах

Безпосередньо голка, при такому способі впливу має бути гострою, або закругленою на кінці, це необхідно для зменшення площі локальної деформації і дає змогу отримати тиск, більший ніж межа пружності кристалу і при цьому важливо не зруйнувати сам кристал.

Якщо тиск прикладеться безпосередньо до кристалу, то для виключення можливого впливу голки на електронні характеристики області, що піддається тиску, остання має бути виготовлена з діелектричного матеріалу або мати діелектричне покриття. При дослідження з кристалом у корпусі голка може бути з будь-якого матеріалу.

Окрім самої голки необхідний динамометр, для фіксування значення тиску, що діє на напівпровідник. У подальшому ці дані необхідно співставити з вимірюваними електричними характеристиками для порівняльного аналізу.

Безпосередньо вимірювання електричних характеристик відбувається за допомогою тестових структур, які існують в мікросхемі конкретних параметрів, які цікаві для дослідження. Або за допомогою високоточних мультиметрів. Особливу цікавість становлять аналогові характеристики мікросхем, оскільки вони найбільш чутливі до впливу деформації. Характеристики цифрових мікросхем також піддаються впливу деформації, але в меншій мірі.

В залежності від мікросхеми розробляються спеціальні тестувальні прилади, які на основі тестових структур мікросхеми вимірюють усі можливі параметри. Такі прилади є індивідуальними для кожного сімейства мікросхем, тому не існує універсального приладу для тестування будь-якої мікросхеми.

Описаний вище метод вимірювання є оптимальним для дослідження зміни електричних характеристик мікросхем при деформації, оскільки дозволяє впливати на конкретне місце мікросхеми відомим тиском і вимірювати відповідну характеристику одночасно. Це дає змогу збирати необхідну інформацію і будувати залежність відповідної характеристики від дії деформації.

Для повного аналізу усіх характеристик мікросхеми необхідно знати тестову структуру останньої. Це потрібно для подальшої розробки і виготовлення тестового приладу, який зможе вимірювати усі можливі

характеристики мікросхеми. Проте інформації про тестові структури не підлягає розголошенню і вільному доступу, тому таке дослідження можна провести лише в лабораторії компанії розробника мікросхеми. На базі будь-якого виробника інтегральних мікросхем існують лабораторії надійності в яких характеристики мікросхем перевіряються на відповідність стандартам.

Проте існує можливість виміряти електричні характеристики окремих напівпровідникових діодів, резисторів чи транзисторів, і на основі отриманих даних побудувати модель впливу деформації на характеристики мікросхеми. Для цього необхідно визначати коефіцієнти чутливості характеристик досліджуваних приладів, а потім провести симуляцію певної мікросхеми, з урахуванням цих коефіцієнтів.

1.15. Обґрунтування вибору методів дослідження

В наукових дослідженнях застосовуються методи, які зображено на рисунку 1.5 [27].

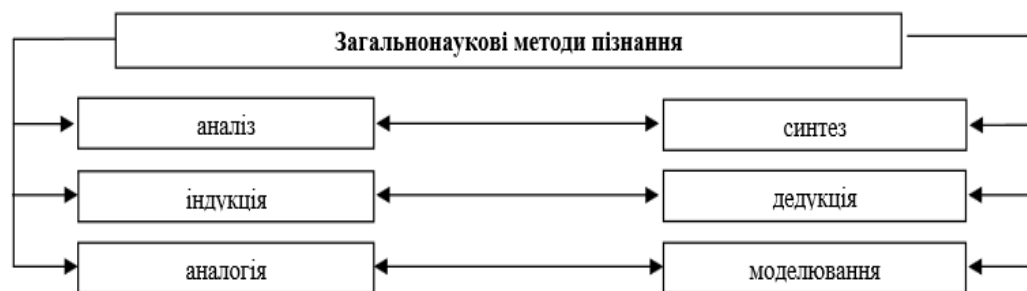


Рисунок 1.5 – Методи загальнонаукового пізнання

Аналіз – метод дослідження, суть якого полягає у тому, що предмет дослідження розчленовується на складові частини і кожна із цих частин досліджується окремо.

Метод теоретичного аналізу в дослідженнях дає можливість розглядати явища та процеси діяльності у різноманітних співвідношеннях, виділяти

найбільш суттєві ознаки, властивості та зв'язки. Аналізування певно процесу чи явища дає змогу визначити окремо його цілі, зміст, технологію, систему взаємовідносин його суб'єктів та ін.

Синтез – метод дослідження, що є протилежним до аналізу і дає змогу здійснювати об'єднання частин об'єкта, який був розчленований у процесі аналізу, встановлюючи зв'язки між частинами і даючи можливість визначити об'єкт дослідження як єдине ціле. Використовуючи метод синтезу, можливо відтворити предмет дослідження як систему зв'язків, взаємодій з акцентуванням уваги на найбільш суттєві компоненти.

Індукція – метод пізнання, за яким при використанні окремих фактів та явищ виводяться загальні принципи та закономірності. Метод індукції використовується у дослідження, в основу яких покладено дослід, експеримент і спостереження, для збору емпіричних фактів.

Дедукція – метод пізнання, за допомогою якого із загальних положень виводять окремі факти, тобто це метод переходу від загальних уявлень до конкретних

Аналогія – метод наукового пізнання, за допомогою якого досягаються знання про одні предмети чи явища на підставі їх схожості з іншими. Це відбувається шляхом переносу характеристик дослідженого об'єкта на інший менш досліджений об'єкт, але схожий з першим за суттєвими властивостями та якостями.

Моделювання – метод наукового пізнання, який полягає у заміні об'єкта, що вивчається, його моделлю, за допомогою якої визначають, або уточнюють характеристики реального об'єкту.

Математична модель – це наближений опис явища чи процесу за допомогою математичних формул. Моделювання є методом пізнання, прогнозування і управління. Аналіз математичних моделей дає уявлення про сутність досліджуваних явищ [28].

Математичне моделювання складається з:

- постановка задачі – по суті це мета даної моделі, для чого вона потрібна. Мета визначає сукупність властивостей об'єкта моделювання, мають бути відбиті у моделі;
- побудова математичної моделі;
- перевірка розробленої моделі.

Увесь процес зводиться виявлення властивостей об'єкта, визначення об'єкта схожого за властивостями досліджуваному. Перший об'єкт називається оригіналом, а другий – моделлю. Якщо при переході від оригіналу до моделі використовується заміна оригіналу на матеріальне тіло чи явище, то така модель називається фізичною; якщо ж оригінал замінюється його описом, то модель є вербальною, математичною або графічною, залежно від способу описання. Модель це системою уявлень про оригінал, його властивості і взаємозв'язки. Вибір об'єктів і методів моделювання визначається поставленою задачею [29].

Серед характеристик математичних моделей виділяють: ступінь універсальності, точність, адекватність, та економічність.

Ступінь універсальності характеризує повноту відображення у моделі властивостей реального об'єкта.

Точність оцінюється за відповідністю параметрів реального об'єкта до значень параметрів, отриманих за допомогою побудованої моделі.

Економічність характеризується затратами обчислювальних ресурсів на її реалізацію.

Адекватність – це здатність відображати задані властивості об'єкта з похибкою, не більше заданої. При цьому адекватність часто спостерігається виключно в обмеженій області зміни зовнішніх параметрів, яка називається областю адекватності математичної моделі.

За ступенем відповідності параметрів моделі до оригіналу виділяють абсолютну і практичну (неабсолютну). Остання, в свою чергу, буває повною, неповною і наближеною [30].

При абсолютній подібності оригінал і модель структурно та фізично подібні. Різниця лише в значеннях параметрів, що описують елементи і зв'язки між ними. Процеси у моделі і оригіналі в цілому, так само як стани окремих елементів, описуються однаковими функціональними залежностями, що пропорційно відрізняються лише значеннями аргументів.

В більшості випадків розв'язання конкретних задач неможливо працювати з явищами, схожими абсолютно у всіх деталях. Тому виникає потреба введення поняття практичної подібності, в межах якої розрізняють повну, неповну і наближену подібності.

Повна подібність – це подібність перебігу у часі та просторі тих процесів, які є суттєвими для цього дослідження і з достатньою повнотою характеризують досліджуване явище стосовно конкретної постановки задачі дослідження.

Неповна подібність – це подібність перебігу процесів лише в просторі чи в часі.

Наближена подібність характеризується існуванням спрощених допущень, які дають змогу вважати подібними відмінні процеси за рахунок свідомих спотворень деяких їх властивостей.

За фізичною природою розрізняють фізичну і математичну подібності. Фізична подібність передбачає однакову фізичну природу подібних явищ.

Фізична подібність може встановлюватися не лише для фізичних явищ, що підпорядковуються детермінованим законам, а і для стохастичних процесів. В цих випадках говорять про статистичну подібність.

Побудову математичної моделі, можна умовно розбити на 4 етапи, які зображено на рисунку 1.6. Етап змістовного опису, формалізації опису, остаточної побудови моделі (ідентифікації параметрів і перевірки адекватності моделі), перегляду і вдосконалення моделі за результатами отриманих даних.

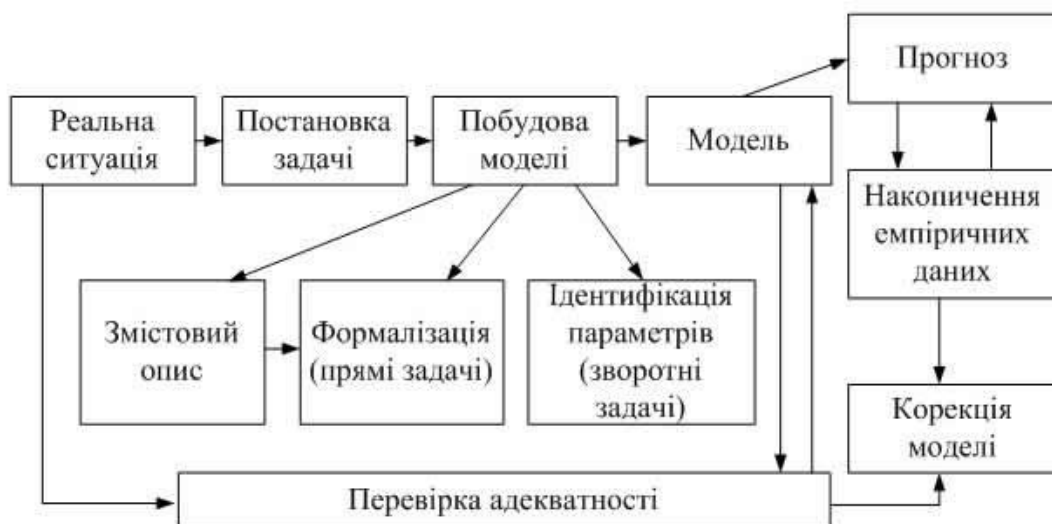


Рисунок 1.6 – Алгоритм побудови математичної моделі

Змістовий опис – це формулювання законів, що пов'язують між собою об'єкти моделі. Визначаються об'єкти моделі і їх взаємозв'язки. Цей етап закінчується записом в математичних термінах сформульованих якісних уявлень про зв'язки між об'єктами моделі з визначенням граничних умов.

Формалізація опису – виявлення математичних співвідношень, що характеризують оригінал з точки зору мети моделювання. На цьому етапі визначається форма подання математичної моделі і проводиться дослідження математичних задач, які впливають з математичних моделей. Серед них основним є розв'язання прямої задачі, тобто отримання в результаті аналізу моделі вихідних даних для подальшого їх зіставлення з результатами спостережень досліджуваних явищ. Важливого значення набувають математичний апарат, необхідний для аналізу математичної моделі, і обчислювальна техніка як засіб отримання кількісної вихідної інформації в результаті розв'язання складних математичних задач.

Остаточна побудова моделі – це етап виявлення того чи відповідає отримана модель теоретичним сподіванням в межах точності спостережень. Якщо модель була повністю визначена, тобто всі її параметри були задані, то виявлення відхилень теоретичних наслідків від результатів спостережень дає

розв'язок прямої задачі з наступною оцінкою відхилень. Якщо відхилення виходять за межі точності спостережень, то модель не може бути прийнята і потребує корегування. Застосування критерію практики до оцінювання математичних моделей дозволяє робити висновок про правильність положень, що лежать в основі моделі, яка підлягає вивченню. Цей метод є єдино можливим для вивчення безпосередньо недоступних нам явищ макро- і мікросвіту.

Перегляд і вдосконалення – подальший аналіз моделі в процесі накопичення даних про досліджувані явища і модернізація моделі. В ході розвитку науки та техніки дані про об'єктивні явища уточнюються і доповнюються, і надходить момент, коли висновки, що отримуються на основі прийнятої моделі, не відповідають нашим знанням про явище.

Метод математичного моделювання дозволяє проектувати різні технічні засоби, що працюють в оптимальних режимах, для розв'язання задач науки і техніки та передбачення нових явищ. Математичні моделі є важливим засобом управління. Вони застосовуються у різних галузях знань, стали необхідним апаратом економічного планування і важливим елементом автоматизованих систем управління [31].

Для вирішення завдань даної роботи доцільно використовувати наступні методи досліджень.

Аналіз та синтез. Використання цих методів дає змогу визначити теоретичні основи впливу тиску на інтегральні компоненти мікросхем та виявити основні залежності між фактором впливу і характеристикою для подальшого створення моделей впливу тиску на характеристики мікросхем. А також визначити методи компенсації даного впливу.

Дедукція. Використовується для формування на підставі існуючих теоретичних даних, власної моделі впливу тиску на електричні характеристики мікросхем автомобільної промисловості.

Моделювання. Використовується для перевірки роботи розроблених моделей і порівняння її з існуючими експериментальними даними.

Висновки по розділу 1

У даному розділі розглянуто класифікацію сучасних інтегральних мікросхем, які використовуються в автомобільній промисловості. Визначено основні види та класи структур мікросхем, а саме біполярну та уніполярну. В дослідженні увага приділяється біполярним мікросхемам, а саме їхнім компонентам – транзисторам, резисторам і діодам. Це пояснюється тим, що вони в своїй основі складаються з сукупності р-n, р-n-р і n-p-n переходів, що характеризуються найбільшою чутливістю до деформації.

Аналіз існуючих механічних деформаційних впливів, які діють на мікросхеми автомобільної електроніки, дозволив виділити найкритичніший вплив, якому піддаються мікросхеми, а саме тиск. За основу дослідження узято саме його.

Розглянувши існуючі методи впливу тиску на кремній обрано неоднорідну деформацію. Вона характерна для реальних мікросхем, оскільки може виникати внаслідок деламінаційних процесів, через дефекти кристалу та корпусу мікросхеми в процесі роботи останньої. Таку деформацію можна відтворити за допомогою тиску голкою на певні ділянки мікросхеми. Цей тиск буде достатнім для фіксування змін характеристик і при цьому не буде пошкоджено сам кристал напівпровідника, як при однорідній деформації.

Проаналізувавши існуючі інтегральні діоди, резистори та транзистори, а також фізичні основи впливу механічного тиску на останні, виявлено основні характеристики кремнію, які піддаються зміні при деформації. До таких характеристик належить концентрація основних і неосновних носіїв струму, яка збільшується з підвищенням тиску. Ширина забороненої зони, яка під впливом тиску в загальному випадку зменшується. Енергетичні рівні, які при деформаційному впливі зміщуються, що призводить до зміни ефективних мас та часу життя носіїв заряду. Ці параметри впливають на безпосередні електричні характеристики напівпровідникових діодів,

транзисторів і резисторів, а саме на зміну ВАХ транзисторів та діодів, коефіцієнтів підсилення, опору резисторів, вихідних і вхідних струмів, тощо.

Запропоновано методику експериментального вимірювання впливу неоднорідної деформації на характеристики інтегральних діодів, резисторів і транзисторів, що дає змогу порівняти теоретичні дані з експериментальними і тим самим перевірити правильність моделі. Розглянуто основні методи наукового дослідження, для даного дослідження обрано методи аналізу, синтезу, дедукції та моделювання.

На основі проведеного аналізу сформульовано наступні задачі подальших досліджень:

- розробити математичну модель впливу тиску на діод, транзистор і резистор;
- розробити математичну модель впливу тиску на характеристики біполярних мікросхем на основі попередньої математичної моделі;
- експериментальне дослідження математичної моделі впливу тиску на діод, транзистор і резистор з кремнію;
- аналіз та розробка методів компенсації впливу тиску на роботу мікросхем.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ТИСКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

Розділ присвячений розробці математичної моделі впливу тиску на інтегральні резистори, діоди та транзистори, а також симуляції цієї моделі. На підставі першого розділу формалізована задача, яка полягає у розробці моделей впливу механічного тиску на електричні характеристики компонентів біполярних мікросхем. Для цього необхідно здійснити математичний опис параметрів, на які впливає тиск, та на основі цих даних побудувати моделі. Розроблену модель буде перевірено на відповідність реальній роботі компоненту, який вона симулює.

2.1. Математична модель впливу тиску на опір кремнієвого резистора

Як відомо з попереднього розділу, причиною зміни опору резистора під впливом тиску є зміна ширини забороненої зони, внаслідок чого відбувається зменшення опору.

Концентрація носіїв струму в напівпровіднику в недеформованому стані описується формулою (1) і (2) для електронів і дірок відповідно [32]:

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{rT}\right), \quad (1)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_v - E_f}{rT}\right), \quad (2)$$

де N_c і N_v – ефективні густини станів у зоні провідності і в валентній зоні, E_c і E_v – енергія дна зони провідності та вершини валентної зони, E_f – рівень Фермі, r – стала Больцмана, T – температура.

Власна концентрація носіїв заряду описується формулою (3) [32]:

$$n_{i0} = \sqrt{(n \times p)} = \sqrt{N_C \times N_V} \times \exp\left(-\frac{E_g}{rT}\right), \quad (3)$$

де n_{i0} – власна концентрація носіїв заряду, E_g – ширина забороненої зони.

Ефективні густини станів у зоні провідності і в валентній зоні розраховуються за формулами (4) і (5) відповідно [32]:

$$N_C = \frac{2}{h^3} \left(\frac{m_n rT}{2\pi}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

$$N_V = \frac{2}{h^3} \left(\frac{m_p rT}{2\pi}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

де π – число Пі, m_n і m_p – ефективна маса електрона і дірки відповідно, h – стала Планка.

В якості інтегральних резисторів у мікросхемах використовується кремній р-типу, в якому концентрація основних і неосновних носіїв при $N_a \gg n_i$ описується формулою (6) і (7) відповідно і мають наступний вигляд [32]:

$$p_p = N_a + \frac{n_{i0}^2}{N_a} \quad (6)$$

$$n_p = \frac{n_{i0}^2}{N_a} \quad (7)$$

де N_a – концентрація акцепторної домішки.

При деформації ширина забороненої зони змінюється, що спричиняє зміну концентрації основних і неосновних носіїв, яка визначається формулами (8) і (9) та має наступний вигляд [32]:

$$p_p = N_a + \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{rT}\right), \quad (8)$$

$$n_p = \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{rT}\right), \quad (9)$$

де ΔE_g – зміни ширини забороненої зони. Така зміна описується рівнянням (10) [17]:

$$\Delta E_g = E_g - \alpha X, \quad (10)$$

де α – баричний коефіцієнт, X – тиск, що діє на кремній.

На підставі вищезазначених формул, зміну концентрації основних і неосновних носіїв заряду в кремнії р-типу можна записати рівнянням (11) та (12) відповідно [32]:

$$p_p = N_a + \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(-\frac{E_g - \alpha X}{rT}\right), \quad (11)$$

$$n_p = \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(-\frac{E_g - \alpha X}{rT}\right) \quad (12)$$

Вплив деформації на опір напівпровідника пояснюється зміною питомої провідності при зміні ширини забороненої зони. Таким чином залежність описується формулою (13) і має наступний вигляд [32]:

$$\sigma_i = e \times (p_p \times \mu_p + n_p \times \mu_n) \times \exp\left(-\frac{E_g - \alpha X}{rT}\right), \quad (13)$$

де σ_i – питома провідність, e – заряд електрона, p_p і n_p – концентрація основних і неосновних носіїв відповідно, μ_p і μ_n – рухливість основних і неосновних носіїв заряду відповідно.

З огляду на те, що питомий опір обернено пропорційний до питомої провідності, за допомогою формул (11) і (12), а також формули опору

провідника (14) можна вивести математичну модель (15) впливу тиску на опір кремнієвого резистора [32].

$$R = \frac{l}{\sigma_i S}, \quad (14)$$

$$R = \frac{l}{e \times \left(\left(N_a + \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(-\frac{E_g - \alpha X}{rT}\right) \right) \times \mu_p + \left(\frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(-\frac{E_g - \alpha X}{rT}\right) \times \mu_n \right) \right) \times \exp\left(-\frac{E_g - \alpha X}{rT}\right) \times S}, \quad (15)$$

де l – довжина напівпровідника, S – площа поперечного перерізу напівпровідника.

2.2. Математична модель впливу тиску на ВАХ діода та транзистора

Вплив тиску на ВАХ діода проявляється у зміні вихідного струму при незмінній напрузі прямого зміщення. При дії тиску значення цієї напруги зменшується, це пов'язано зі зміною ширини забороненої зони. Така зміна описується формулою (16) і має такий вигляд [32]:

$$U = \frac{E_g - \alpha X}{e}, \quad (16)$$

де U – пряме падіння напруги на р-п переходу.

Густина струму р-п переходу залежить від концентрації неосновних носіїв заряду і визначається за формулою (17) та має вигляд [32]:

$$J = e \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \times \left(\exp\left(\frac{eU_{np}}{rT}\right) - 1 \right), \quad (17)$$

де J – повна густина струму, D_n і D_p – коефіцієнти дифузії електронів і дірок відповідно, L_n і L_p – дифузійні довжини електронів у р-області і дірок у

n-області відповідно, U_{np} – напруга прикладена до переходу.

Формулу (17) можна записати інакше. Використавши співвідношення між дифузійними довжинами і часом життя носіїв (18), а також співвідношення між рухливістю носіїв заряду і коефіцієнтом дифузії (19) отримано формулу (20) [32]:

$$L_n^2 = D_n \times \tau_n, L_p^2 = D_p \times \tau_p, \quad (18)$$

$$D_p = \frac{rT}{e} \mu_p, D_n = \frac{rT}{e} \mu_n, \quad (19)$$

$$J = (e r T)^{\frac{1}{2}} \times \left(p_n \sqrt{\frac{\mu_n}{\tau_n}} + n_p \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_p}} \right) \times \left(\exp \left(\frac{e U_{np}}{r T} \right) - 1 \right), \quad (20)$$

де τ_n і τ_p – час життя електронів і дірок відповідно.

Вираз (20) характеризує повну густину струму діода, яка визначається переважно дрейфовою складовою. Якщо підставити в цю формулу значення концентрації носіїв і помножити густину на площу поперечного перерізу p-n переходу, отримаємо математичну модель впливу тиску на діод (21), яка має наступний вигляд [32]:

$$I = S \times (e r T)^{\frac{1}{2}} \times \left(\left(\frac{n_{i0a}^2}{N_d} \exp \left(-\frac{E_g - \alpha X}{r T} \right) \sqrt{\frac{\mu_n}{\tau_n}} \right) + \frac{n_{i0a}^2}{N_a} \exp \left(-\frac{E_g - \alpha X}{r T} \right) \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_p}} \right) \times \left(\exp \left(\frac{e U_{np}}{r T} \right) - 1 \right), \quad (21)$$

де N_d – концентрація донорної домішки.

Основні фізичні принципи залежності зміни характеристик транзистора від тиску є аналогічними до змін у діоді.

Одним з найважливіших параметрів біполярних транзисторів є коефіцієнт підсилення по струму β , який визначається формулою (22):

$$\beta = \frac{I_k}{I_b}, \quad (22)$$

де I_k – струм колектора, I_b – струм бази.

Залежність маси носіїв заряду від тиску описується формулою (23) [32]:

$$m_i = m_0 \times \left(1 - \frac{E_g - \alpha X}{E_g} \right), \quad (23)$$

де m_i – маса носія заряду під впливом деформації, m_0 – початкова маса носія заряду.

Залежність рухливості носія заряду від тиску відображає формула (24) і має наступний вигляд [32]:

$$\mu_i = \frac{e\tau_i}{m_i} \quad (24)$$

де τ_i – середній час релаксації.

2.3. Експериментальне дослідження впливу тиску на ширину забороненої зони

Зміну ширини забороненої зони описує формула (10). Баричний коефіцієнт α для кремнію становить $3,57 \times 10^{-11} \frac{\text{eV}}{\text{Па}}$. Звідси видно, що характер залежності лінійний, тобто ширина забороненої зони зменшується зі збільшенням тиску лінійно. Ця формула отримана емпіричним шляхом, причому коефіцієнт α обирався як середнє між теоретично отриманим та експериментальним значеннями. Також, для спрощення розрахунків вважалось, що зміщення ширини забороненої зони при дії тиску відбувається

прямо пропорційно, а константи деформаційного потенціалу обирались як середнє значення з кількох довідникових джерел.

Зважаючи на усі спрощення та приближення, які використовувались при виведенні формули (10), висунуто гіпотезу про недостатню точність для використання її в подальших математичних моделях.

Поставлено задачу, суть якої полягає у перевірці висунутої гіпотези. Для цього вирішено провести два експерименти. Один з пасивним елементом, а інший з активним. Таке рішення пояснюється бажанням виключити вплив особливостей технологічних процесів виготовлення та використання приладу на зміну ширини забороненої зони. Очікується, що характер зміни параметрів буде тотожним як для пасивного, так і для активного елементів. Знаючи механізм впливу зміни ширини забороненої зони на досліджуваний параметр, можна визначити характер безпосередньої зміни ширини в залежності від тиску. Якщо характер зміни буде відповідати формулі (10), то останню буде підтверджено, а якщо ні – формула потребуватиме введення уточнюючого коефіцієнту.

В першому експерименті вимірювався опір інтегрального резистора номіналом 100 Ом, довжина резистора складає $1,5 \times 10^{-4}$ см, площа поперечного перерізу $3 \times 10^{-8} \text{ см}^2$. Експеримент проводився таким чином: на резистор прикладався тиск і вимірювався опір.

У другому експерименті проводилося вимірювання ВАХ діода, площа поперечного перерізу якого складає $2,75 \times 10^{-8} \text{ см}^2$. Під час проведення експерименту напруга прямого зміщення була незмінна і становила 0,3 В. При цьому прикладався тиск і фіксувалось значення вихідного струму. Також для виключення впливу саморозігріву напівпровідника при протіканні струму через нього останній обмежено до 30 мА.

Вимірювання проводилися за допомогою спеціального стенду, блок-схема якого показана на рисунку 2.1.

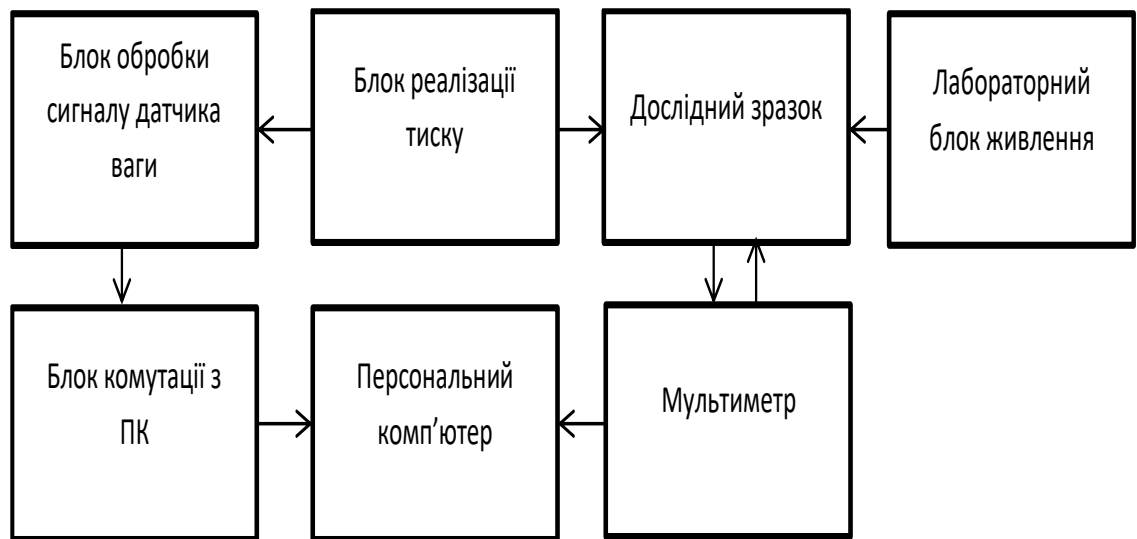


Рисунок 2.1 – Блок-схема стенду для вимірювання

Для візуалізації та обробки отриманих даних використано ПК. Блок комутації забезпечує зв'язок із ПК користувача для фіксації тиску, що діє на зразок. Блок обробки сигналу датчика сили перетворює аналоговий сигнал з датчика в цифровий для подальшої обробки на ПК. Блок реалізації тиску складається з датчика сили, що вимірює тиск, який створює голка на зразок, та механічного преса. Останній реалізує керування тиском, що діє на зразок.

Мультиметр виконує 4-х контактне вимірювання опору резисторів, ВАХ діодів та транзисторів з подальшою комутацією з ПК через вбудований інтерфейс. Лабораторний блок живлення необхідний для подачі різномірної тестової напруги і струму на дослідний зразок, яким є декапсульований кристал.

Для візуалізації і обробки отриманих даних використовується програма, розроблена в графічній оболонці LabVIEW, яка запускається на ПК, до якого за допомогою USB підключається мультиметр та блок обробки даних з датчика сили через відповідний блок. Застосовано високоточний мультиметр Keithley 2100, який реалізує як 4-х контактну схему вимірювання, так і звичайну 2-х контактну, та має вбудований інтерфейс для підключення до ПК через USB. Як датчик ваги у блоці реалізації тиску використано аналоговий тензодатчик Tecsіs F2210 з діапазоном вимірювання

від 0 Па до 100 ГПа з похибкою у 1 Па, та механічний прес. Блок обробки сигналу з датчика сили реалізований на АЦП НХ711, розрядність перетворення складає 24 біти. Для комутації НХ711 з ПК слугує мікроконтролер Arduino Nano, який попередньо прошитий спеціальною програмою-завантажувачем.

Це необхідно для перетворення передачі даних з АЦП до ПК в необхідний формат. Забезпечення тестової напруги і струму для дослідних зразків реалізує Nameg НМ7042-5 – це високоточний лабораторний блок живлення на 3 канали, з допустимою напругою до 32 В і струмом до 5 А на канал. Після отримання даних з датчика ваги відбувається їх обробка.

Похибка вимірювання цим стендом визначається похибкою мультиметра і складає +/- 0,001 В для напруги та +/- 0,0001 А для струму. Також похибку в +/- 1 Па вносить датчик вимірювання сили.

Результати першого експерименту внесені в таблицю 2.1. Результати другого експерименту представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Залежність опору від тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40
Опір, Ом	100	30,48	3,16	0,18	0,01	$6,3 \times 10^{-4}$	$3,78 \times 10^{-5}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

Таблиця 2.2 – Залежність вихідного струму діоду від тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40
Струм, А	$3,6 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-8}$	$3,1 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-5}$	$7,7 \times 10^{-4}$	0,02	> 0,03	> 0,03	> 0,03

Згідно з отриманими даними, опір резистора зі збільшенням тиску зменшується, а вихідний струм діода – збільшується. Для резистора таке явище пояснюється зменшенням ширини забороненої зони, внаслідок чого питома провідність зростає. Збільшення вихідного струму діода пояснюється

збільшенням концентрації неосновних носіїв внаслідок зменшення ширини забороненої зони.

При дії тиску більше 25 ГПа значення вимірюваних параметрів у першому експерименті менше мінімально можливого, яке може виміряти мультиметр. У другому експерименті при тому ж тиску вимірюване значення перевищує обмеження, тому для подальших розрахунків використовуватимуться дані, отримані при тиску до 25 ГПа включно.

Відповідно до формул (15) і (21) зміна ширини забороненої зони визначається виразом $\Delta E_g = E_g - \alpha X$, отже ширина зменшується лінійно. На основі вище отриманих даних розраховано значення параметру αX . Дані відображені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Експериментальне значення αX від тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25
Резистор	0	-1,12	-1,18	-1,25	-1,32	-1,4	-1,46
Діод	0	-1,18	-1,23	-1,28	-1,35	-1,46	-1,51
Формула	0	-0,037	-0,17	-0,35	-0,53	-0,7	-0,89

На основі цих даних побудовано графік, який зображено на рисунку 2.2.

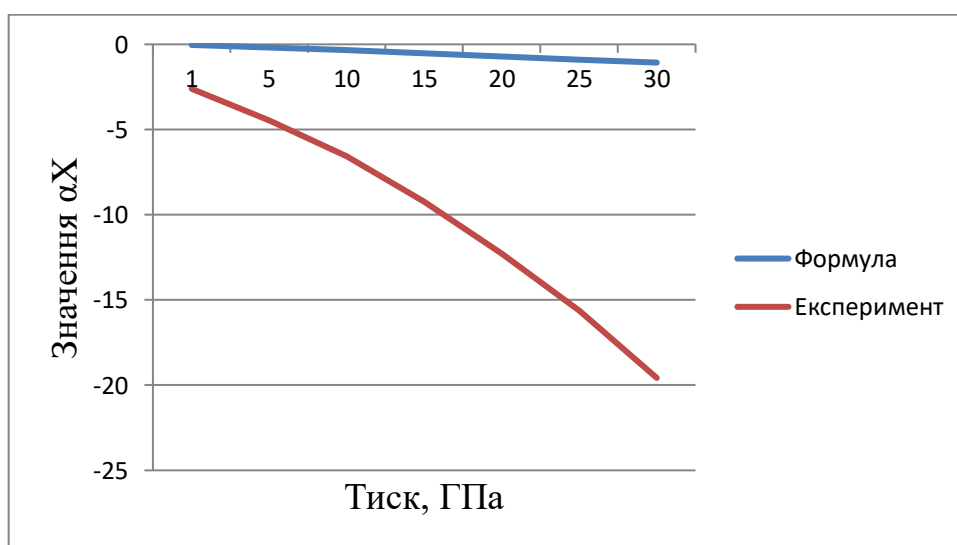


Рисунок 2.2 – Залежність значення αX від тиску

Цей графік свідчить про те, що експериментально визначений характер зміни ширини забороненої зони не відповідає значенням, отриманим за допомогою формули (10). Отож, це підтверджує правильність вище запропонованої гіпотези. Це означає, що описану вище формулу не можна вважати точною. Для проведення подальших розрахунків необхідно визначити уточнюючі коефіцієнти.

2.4. Математична модель залежності ширини забороненої зони від тиску

Для визначення уточнюючих коефіцієнтів дані з (табл. 2.3) були перераховані з урахуванням того, що X – це значення прикладеного тиску в Па, а α згідно літератури дорівнює $3,57 \times 10^{-11} \frac{\text{eV}}{\text{Па}}$. Таким чином визначається експериментальне значення уточнюючого коефіцієнту γ . Результати відображені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Експериментальне значення γ від тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25
Резистор	0	−31,56	−6,64	−3,51	−2,48	−1,96	−1,64
Діод	0	−33,2	−6,9	−3,59	−2,53	−1,99	−1,69

Зважаючи на отримані дані побудовано графік, зображений на рисунку 2.3. Видно, що в обох експериментах значення γ співпадають з середньою похибкою 3,9 %. Це означає, що фізика процесу зміни ширини забороненої зони не залежить від технологічних особливостей виготовлення компоненту чи способу його експлуатації. Похибку можна пояснити наявністю людського фактору при проведенні вимірювань. З урахуванням цього вважатимемо, що значення γ однакові для обох дослідів.

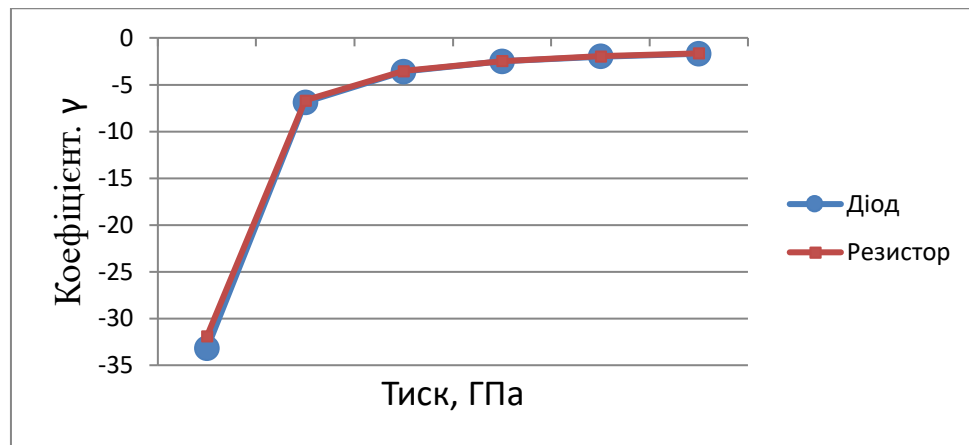


Рисунок 2.3 – Залежність значення γ від тиску

Для того, щоб на основі отриманих коефіцієнтів визначити їх залежність від тиску, необхідно скористатись математичним апаратом апроксимації. Для одержання найточнішого результату необхідно провести розрахунки різними методами апроксимації і порівняти їхню середню похибку апроксимації. При розрахунках використовувались методи лінійної, квадратичної, кубічної, степеневі, показникової, логарифмічної, гіперболічної та експоненціальної апроксимації.

Лінійна апроксимація – це пряма лінія, що щонайкраще описує набір даних, які постійно збільшуються, або зменшуються з часом. Описується рівнянням (25) [33]:

$$y = a \times x + b \quad (25)$$

де y і x – експериментально отримані дані, а a та b – константні значення які розраховуються. Для розрахунку константних значень використовують метод найменших квадратів. Суть даного методу полягає в знаходженні таких значень a і b , при яких сума квадратів відхилень експериментальних даних від знайденої прямої буде найменшою [33].

Квадратична і кубічна апроксимації використовуються для опису величин, що поперемінно зростають і зменшуються, тобто характер

розподілу яких не є постійно зростаючим чи спадаючим. Описуються рівняннями (26) і (27) відповідно [33]:

$$y = a \times x^2 + b \times x + c \quad (26)$$

$$y = a \times x^3 + b \times x^2 + c \times x + d \quad (27)$$

де a, b, c, d – константні значення які розраховуються. Для розрахунку вказаних вище константних значень у випадку квадратичної апроксимації використовують метод Пауелла. Метод дає можливість апроксимації гладкої функції поліномом достатньо високого порядку і використання цього полінома для оцінювання точки оптимуму. Для кубічної апроксимації застосовується вирішення системи рівняння з використанням кубічного інтерполяційного багаточлену Ерміта. Після кожного наближення правильність обчислень підтверджується зменшенням мінімального значення многочлена в порівнянні з його мінімальним значенням на попередньому кроці [33].

Степенева і показникова апроксимації застосовується, якщо досліджувана залежність характеризується постійною швидкістю росту. . Описуються рівняннями (28) і (29) відповідно [33]:

$$y = a \times x^b \quad (28)$$

$$y = a \times b^x \quad (29)$$

Для знаходження константних коефіцієнтів в даних методах функцію приводять до лінійного виду, шляхом логарифмування, а потім використовуючи метод найменших квадратів знаходять значення коефіцієнтів.

Логарифмічна та гіперболічна апроксимації використовуються коли характер досліджуваної залежності спочатку швидко зростає або спадає, а потім поступово стабілізуються. Описуються рівняннями (30) і (31) відповідно [33]:

$$y = a \times \ln x + b \quad (30)$$

$$y = a + \frac{b}{x} \quad (31)$$

Константних коефіцієнтів в даних методах заходяться аналогічно до степеневій та показниковій апроксимації. Функцію залежності приводять до лінійного виду, а потім використовуючи метод найменших квадратів знаходять необхідні коефіцієнти.

Експоненціальна апроксимація застосовується, коли швидкість зміни досліджуваної залежності безперервно зростає. Описується рівнянням (32) [33]:

$$y = a \times e^{(b \times x)} \quad (32)$$

Визначення константних значень аналогічно до попередніх методів.

З вказаних вище особливостей видно, що лінійний, квадратичний і кубічний методи апроксимацію використовувати недоцільно, оскільки характер розподілу експериментально отриманих значень не є лінійним, та поперемінно змінним. Результати розрахунків показані в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Похибки методів апроксимації

Апроксимація	Степенева	Показникова	Логарифмічна	Гіперболічна	Експоненціальна
Середня похибка, %	2,7	8,2	7,6	1,1	6,8

Найточнішою виявилась гіперболічна і степенева апроксимації. Для підвищення точності апроксимації розрахунки проводилися з використанням 25 точок експериментальних даних.

Усі розрахунки проводились з використанням програми MATLAB R2016a.

Обрано результат, отриманий за допомогою гіперболічної апроксимації, оскільки він виявився найточнішим. Формулу залежності уточнюючого коефіцієнту γ від тиску (33) наведено нижче:

$$\gamma = -0,40005 + \frac{-31,48}{x} \quad (33)$$

На основі формули (33) розраховані уточнюючі коефіцієнти в залежності від тиску. Результати занесені до таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Отримані значення γ від тиску

Тиск, ГПа	1	5	10	15	20	25
Експеримент	-31,875	-6,692	-3,545	-2,495	-1,971	-1,656
Апроксимація	-31,88	-6,696	-3,458	-2,498	-1,974	-1,659

Середня похибка між експериментом та апроксимацією складає не більше 2 %, що свідчить про вдалу апроксимацію. Таким чином, з урахуванням отриманого уточнюючого коефіцієнту в формулах (15) і (21), вираз, що описує зміну ширини забороненої зони, буде мати вигляд $\Delta E_g = E_g - \alpha X \gamma$. Усі подальші розрахунки будуть проводитись з урахуванням уточнюючих коефіцієнтів.

2.5. Експериментальне дослідження впливу тиску на коефіцієнт підсилення β в біполярних транзисторах

Коефіцієнт підсилення по струму є одним з найважливіших параметрів біполярного транзистора. Згідно формули (22), підсилення визначається відношенням струму колектора до струму бази. Причому зі збільшенням струму колектора збільшується коефіцієнт підсилення. Формули залежності β від тиску не існує. Для того, щоб розрахувати цей коефіцієнт через струми колектора і бази необхідно знати залежність струму бази від тиску. Відомо, що струм бази має рекомбінаційний характер, проте формули, що описує цю залежність від тиску не знайдено. Тобто теоретично неможливо змодельовати вплив тиску на коефіцієнт підсилення. Таким чином виникає задача, яка полягає в експериментальному дослідженні впливу тиску на коефіцієнт підсилення за струмом.

Для визначення впливу тиску на коефіцієнт підсилення за струмом проведено експеримент, суть якого полягає у вимірюванні вхідного струму колектора та бази. Дослідження проводилось з n-p-n транзистором, який увімкнено за схемою зі спільним емітером. Тобто використовується в якості підсилювача. При проведенні вимірювань напруга на база-емітерному переході складала 0,7 В, вхідний струм бази визначався лабораторним блоком живлення. Напруга колектор-емітер становила 9 В, струм не обмежувався. Результати дослідження продемонстровані в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Отримані значення β від тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25
I_k, A	$2,02 \times 10^{-6}$	$9,28 \times 10^{-6}$	$1,48 \times 10^{-5}$	$7,23 \times 10^{-4}$	$4,07 \times 10^{-3}$	$1,48 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-1}$
I_b, A	$2,02 \times 10^{-8}$	$9,1 \times 10^{-8}$	$1,47 \times 10^{-7}$	$7,31 \times 10^{-6}$	$4,03 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$2,91 \times 10^{-3}$
β	100	102	101	99	101	99	99

З експериментальних даних видно, що коефіцієнт підсилення не залежить від тиску, зміна характерна лише для струмів. Видно, що значення β не є однаковими на всіх проміжках вимірювання. Це можна пояснити похибкою вимірювання, що спричинена людським фактором.

Поставлену вище задачу можна вважати вирішеною. Експеримент показав, що коефіцієнт підсилення не залежить від тиску. Відомо, що коефіцієнт визначається відношенням струму колектора до струму бази. Це означає, що залежність зміни струму бази від тиску аналогічна до зміни струму колектора. Внаслідок однакового характеру залежності струму, коефіцієнт підсилення не залежить від дії тиску.

2.6. Розрахунок параметрів за отриманими моделями

Отримані формули дають змогу чисельно розрахувати зміну провідності і густини струму при дії тиску. На основі цих параметрів можна розрахувати опір і струм для конкретних розмірів приладів. При проведенні розрахунків вважається, що час життя носіїв заряду не залежить від тиску і є незмінним.

У розроблених моделях похибка вноситься за рахунок використання константних значень часу життя, рухливості і ефективної маси носія заряду. Розрахунки показали, що вплив тиску на ці параметри не вносить значної зміни, тому на кінцевий результат майже не впливає, що дозволяє нехтувати цими змінами. Відтак, це нехтування вносить певну похибку в модель, але на загальний результат критичного впливу не має.

Також слід розуміти, що усі розрахунки проводились за умови, що температура матеріалу і зовнішнього середовища складає 300 К. А в реальних умовах температура змінюється. Наприклад, при протіканні струму з часом відбувається саморозігрів зразка, який також впливає на значення струму. Загалом, збільшення температури призводить до зменшення ширини

забороненої зони, і, як наслідок, до збільшення струму. Механізм впливу схожий до впливу тиску.

При побудові моделі не враховувались особливості технологічних процесів виготовленого кремнію, кількість дефектів кристалічної решітки, концентрації домішок та інші фактори, які впливають на ширину забороненої зони та концентрацію неосновних носіїв у напівпровіднику. Усі розрахунки проводились з використанням програми MATLAB R2016a.

Основні значення констант та деяких змінних, які використовуються для розрахунку, показані в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Основні константи для розрахунку

Змінна	$\gamma, \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	T, К	$h, \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$	E_g, eV	$\alpha, \frac{\text{eV}}{\text{Па}}$	e, Кл	$\tau_i, \text{с}$	$m_n, \text{кг}$	$m_p, \text{кг}$	$m_0, \text{кг}$
Розмір-ність	$1,38 \times 10^{-23}$	300	$1,05 \times 10^{-34}$	1,12	$3,57 \times 10^{-11}$	$1,6 \times 10^{-19}$	10^{-13}	$9,65 \times 10^{-31}$	$5,11 \times 10^{-31}$	$9,11 \times 10^{-31}$

Значення рухливості носіїв заряду залежить не тільки від деформації, але і від концентрації домішок в кремнії. Значення цих параметрів наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Значення рухливості для різних концентрацій

$N, \text{см}^{-3}$	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}	10^{21}	10^{22}
$\mu_p, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$	483	459	399	258	159	80	47	35	31
$\mu_n, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$	1358	1345	1248	801	263	115	95	92	90

На основі формули (24) та даних з таблиці 2.9, розраховано значення ефективної маси носіїв заряду в залежності від концентрації домішок. Дані відображені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Ефективна мас носіїв заряду для різних концентрацій

$N, \text{см}^{-3}$	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}	10^{21}	10^{22}
$m_p, \times 10^{-31} \text{кг}$	0,331	0,348	0,4	0,62	1,006	2	3,40	4,57	5,16
$m_n, \times 10^{-31} \text{кг}$	0,11	0,11	0,12	0,19	0,608	1,39	1,68	1,7	1,77

Зважаючи на значення з (табл. 2.10), за допомогою формули (23) визначено вплив тиску в 40 ГПа на зміну ефективної маси носіїв заряду. Розраховані значення відображені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Залежність ефективної маси носіїв заряду від тиску

$N, \text{см}^{-3}$	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}	10^{21}	10^{22}
$m_p, \times 10^{-31} \text{кг}$	0,316	0,333	0,383	0,592	0,96	1,912	3,254	4,37	4,93
$m_n, \times 10^{-31} \text{кг}$	0,11	0,11	0,12	0,19	0,581	1,33	1,61	1,662	1,699

Згідно з отриманими даними видно, що тиск майже не впливає на ефективну масу носіїв заряду, тому в подальших розрахунках вважатимемо, що ефективна маса не залежить від дії тиску. На основі даних з (табл. 2.10) розраховано ефективну густину станів у зоні провідності і в валентній зоні. Результати вказані в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Ефективна густина станів

$N, \text{см}^{-3}$	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}	10^{21}	10^{22}
$N_C, \text{см}^{-3}$	$1,62 \times 10^{18}$	$1,75 \times 10^{18}$	$2,163 \times 10^{18}$	$4,15 \times 10^{18}$	$8,58 \times 10^{19}$	$2,43 \times 10^{19}$	$5,35 \times 10^{19}$	$8,38 \times 10^{19}$	$9,99 \times 10^{19}$
$N_v, \text{см}^{-3}$	$3,33 \times 10^{17}$	$3,33 \times 10^{17}$	$3,37 \times 10^{17}$	$7,53 \times 10^{17}$	$4,03 \times 10^{18}$	$1,37 \times 10^{19}$	$1,85 \times 10^{19}$	$1,88 \times 10^{19}$	$2,05 \times 10^{19}$

Знаючи ефективну густину станів можна розрахувати власну концентрацію носіїв заряду в напівпровіднику за формулою (3). Результати наведені в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 – Власна концентрація носіїв заряду

$N, \text{см}^{-3}$	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}	10^{21}	10^{22}
$n_0, \text{см}^{-3}$	2,88 $\times 10^{10}$	2,98 $\times 10^{10}$	3,543 $\times 10^{10}$	6,935 $\times 10^{10}$	2,278 $\times 10^{11}$	7,173 $\times 10^{11}$	1,23 $\times 10^{12}$	1,58 $\times 10^{12}$	1,79 $\times 10^{12}$

Тепер розрахуємо кількість носіїв заряду для провідника р-типу при різних концентраціях акцепторної домішки за допомогою формул (6) і (7). Результати занесені в таблицю 2.14. При розрахунку вважатимемо, що власна концентрація носіїв $n_0 = 1,6 \times 10^{10} \text{см}^{-3}$.

Таблиця 2.14 – Концентрація основних і неосновних носіїв заряду

$N_a, \text{см}^{-3}$	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}
$p_p, \text{см}^{-3}$	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}
$n_p, \text{см}^{-3}$	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4	10^3	10^2	10^1	10

Для розрахунку зміни концентрації основних і неосновних носіїв використано наступні значення: $p_p = 10^{18} \text{см}^{-3}$, а $n_p = 10^2 \text{см}^{-3}$. Розрахунок проводився з використанням формул (11) та (12). Дані вказані в таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Зміна концентрації носіїв при дії тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40
$p_p, \text{см}^{-3}$	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
$n_p, \text{см}^{-3}$	10^2	1,36 $\times 10^3$	8,75 $\times 10^3$	7,14 $\times 10^4$	1,05 $\times 10^6$	2,13 $\times 10^7$	6,08 $\times 10^8$	3,17 $\times 10^{10}$	1,87 $\times 10^{13}$	2,27 $\times 10^{16}$

На основі даних з (табл. 2.15) побудовано графік, який зображено на рисунку 2.4. Лінія з ромбиками відповідає концентрації основних носіїв. Згідно з отриманими даними видно, що тиск не впливає на концентрацію основних носіїв. Зважаючи на формулу (11) $N_a \gg \frac{n_{i0}^2}{N_a} \exp\left(-\frac{E_g - \alpha X \gamma}{rT}\right)$, зміна

концентрації неосновних носіїв є набагато меншою, ніж концентрація основних, саме тому концентрація основних носіїв під дією тиску залишається незмінною.

Лінія з квадратами показує концентрацію неосновних носіїв заряду. Як видно з графіка, зі збільшенням тиску концентрація значно збільшується за експоненціальним законом. При значеннях тиску, близьких до межі пружності кремнію, концентрація неосновних носіїв може стати навіть більшою, ніж концентрація основних.

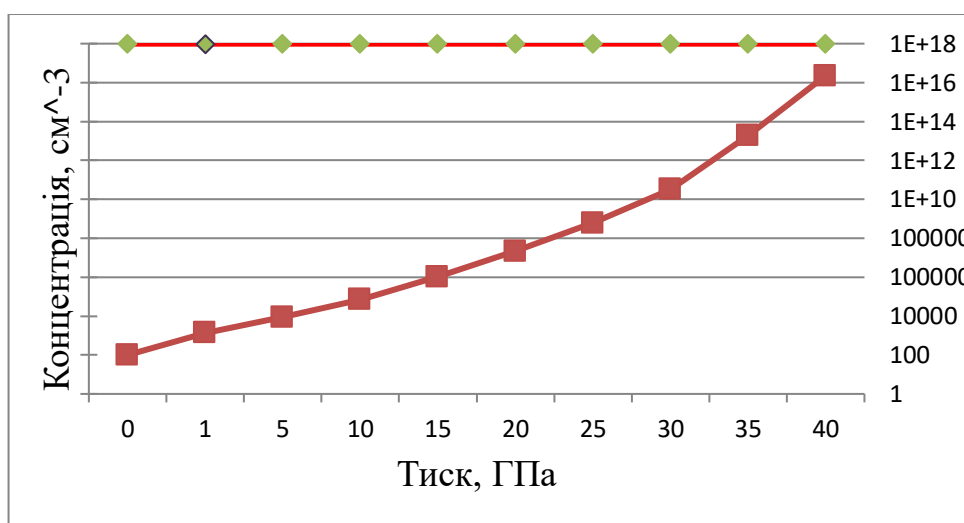


Рисунок 2.4 – Залежність концентрації носіїв від тиску

Таке збільшення концентрації неосновних носіїв не вносить помітну зміну в провідність домішкового кремнію, проте, внаслідок зменшення ширини забороненої зони, провідність збільшується. Для оцінки цієї зміни використано дані з (табл. 2.15) та форму (13). Результати внесені в таблицю 2.16.

Для наочності побудовано графік залежності питомої провідності від тиску, який зображено на рисунку 2.5. З отриманих даних видно, що питома провідність зростає зі збільшенням тиску за експоненціальним законом.

Таблиця 2.16 – Зміна питомої провідності кремнію при дії тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40
ρ_p , см^{-3}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}	10^{18}
n_p , см^{-3}	10^2	$9,27 \times 10^2$	$7,83 \times 10^3$	$7,14 \times 10^4$	$7,66 \times 10^6$	$1,03 \times 10^7$	$8,79 \times 10^8$	$1,97 \times 10^{10}$	$4,61 \times 10^{13}$	$5,17 \times 10^{16}$
σ , $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	80	121,1	$1,72 \times 10^3$	2×10^4	$3,4 \times 10^5$	$5,86 \times 10^6$	$9,94 \times 10^7$	$2,47 \times 10^9$	$4,19 \times 10^{12}$	$5,76 \times 10^{15}$

Попередні розрахунки показали, що концентрація основних носіїв у домішковому кремнії не змінюється під дією тиску. Це свідчить про те, що питома провідність змінюється за рахунок зменшення ширини забороненої зони згідно формули (13).

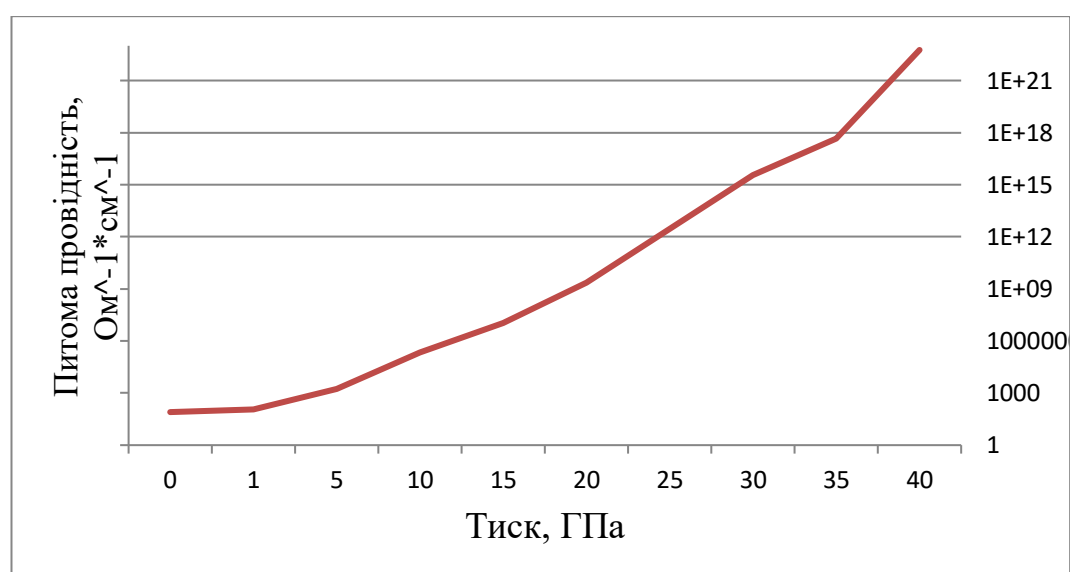


Рисунок 2.5 – Залежність питомої провідності від тиску

Слід зауважити, що зменшення ширини забороненої зони призводить до збільшення концентрації неосновних носіїв, проте ця зміна менша, ніж концентрація основних носіїв, тому зміна питомої провідності визначається зміною ширини забороненої зони.

Питома провідність обернено пропорційна до питомого опору, це означає, що опір такого кремнієвого резистора буде зменшуватися зі зростанням тиску. Така зміна зображена на рисунку 2.6.

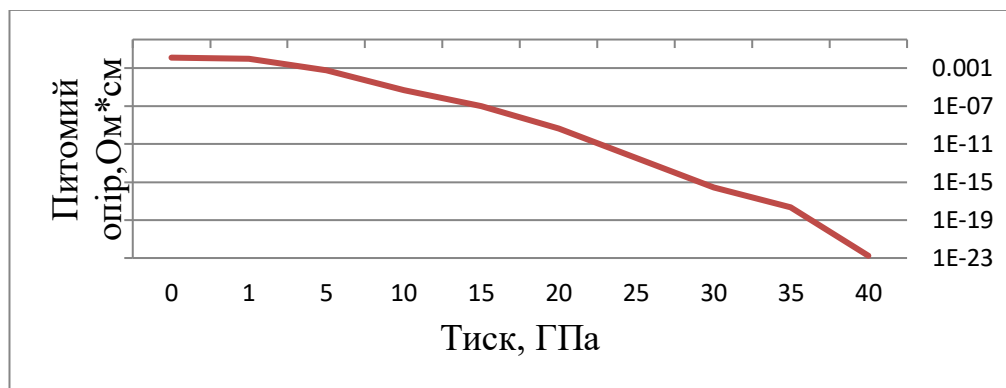


Рисунок 2.6 – Залежність питомого опору від тиску

На основі формули (21) розраховано густину струму для р-п переходу при прямому зміщенні. Результати показані в таблиці 2.17. При розрахунку вважається, що початкова концентрація неосновних носіїв становить $n_p = p_n = 10^2 \text{ см}^{-3}$. Це пов'язано з тим, що струм р-п переходу визначається концентрацією неосновних носіїв. До того ж їхня концентрація змінюється так само відносно тиску, якщо початкова концентрація донорних та акцепторних домішок однакова. При розрахунках вважається, що $N_a = N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, напруга прямого зміщення становить 0,7 В, $\tau_n = \tau_p = 2,5 \times 10^3 \text{ с}$.

Таблиця 2.17 – Зміна густини струму при дії тиску

Тиск, ГПа	0	1	5	10	15	20	25	30	35	40
$p_n, \text{см}^{-3}$	10^2	$9,27 \times 10^2$	$7,83 \times 10^3$	$7,14 \times 10^4$	$7,66 \times 10^6$	$1,03 \times 10^7$	$8,79 \times 10^8$	$1,97 \times 10^{10}$	$4,61 \times 10^{13}$	$5,17 \times 10^{16}$
$n_p, \text{см}^{-3}$	10^2	$9,27 \times 10^2$	$7,83 \times 10^3$	$7,14 \times 10^4$	$7,66 \times 10^6$	$1,03 \times 10^7$	$8,79 \times 10^8$	$1,97 \times 10^{10}$	$4,61 \times 10^{13}$	$5,17 \times 10^{16}$
$J, \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$	$1,5 \times 10^4$	$5,04 \times 10^5$	$3,2 \times 10^6$	$2,6 \times 10^7$	$3,8 \times 10^8$	$7,89 \times 10^9$	$2,25 \times 10^9$	$1,7 \times 10^{13}$	$6,9 \times 10^{17}$	$8,4 \times 10^{18}$

З отриманих даних видно, що через різке збільшення концентрації неосновних носіїв густина струму різко зростає зі збільшенням тиску. Для аналізу зміни ВАХ діода у прямому зміщенні необхідно провести розрахунок за формулою (21) при різних значеннях прикладеної напруги. Розраховані дані внесені до таблиці 2.18.

Таблиця 2.18 – Густина струму в залежності від прикладеної напруги і тиску

Тиск, ГПа		0	1	5	10	15	20	25	30	35	40
$J, \frac{A}{cm^2}$	$U_{пр} = 0,1 \text{ В}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-3}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$4,44 \times 10^{-1}$	$1,27 \times 10^1$	$6,61 \times 10^2$	$3,9 \times 10^5$	$4,7 \times 10^8$
	$U_{пр} = 0,4 \text{ В}$	0,12	5,64	$3,63 \times 10^1$	$2,96 \times 10^2$	$4,36 \times 10^2$	$8,84 \times 10^4$	$2,52 \times 10^6$	$1,31 \times 10^8$	$7,76 \times 10^{10}$	$9,42 \times 10^{13}$
	$U_{пр} = 0,7 \text{ В}$	$1,5 \times 10^4$	$5,04 \times 10^5$	$3,2 \times 10^6$	$2,6 \times 10^7$	$3,8 \times 10^8$	$7,89 \times 10^9$	$2,25 \times 10^9$	$1,7 \times 10^{13}$	$6,9 \times 10^{17}$	$8,4 \times 10^{18}$
	$U_{пр} = 1 \text{ В}$	$5,08 \times 10^8$	$4,5 \times 10^{10}$	$2,9 \times 10^{11}$	$2,36 \times 10^{12}$	$3,47 \times 10^{12}$	$7,05 \times 10^{14}$	$2,01 \times 10^{16}$	$1,05 \times 10^{18}$	$6,19 \times 10^{20}$	$7,51 \times 10^{23}$

На основі даних з (табл. 2.18) побудовано графік залежності густини вихідного струму від дії тиску при різних значеннях напруги прямого зміщення. Графік зображено на рисунку 2.7. Відповідно до нього, густина струму різко зростає зі збільшенням тиску за експоненціальним законом. Це пояснюється різким збільшенням концентрації неосновних носіїв струму.

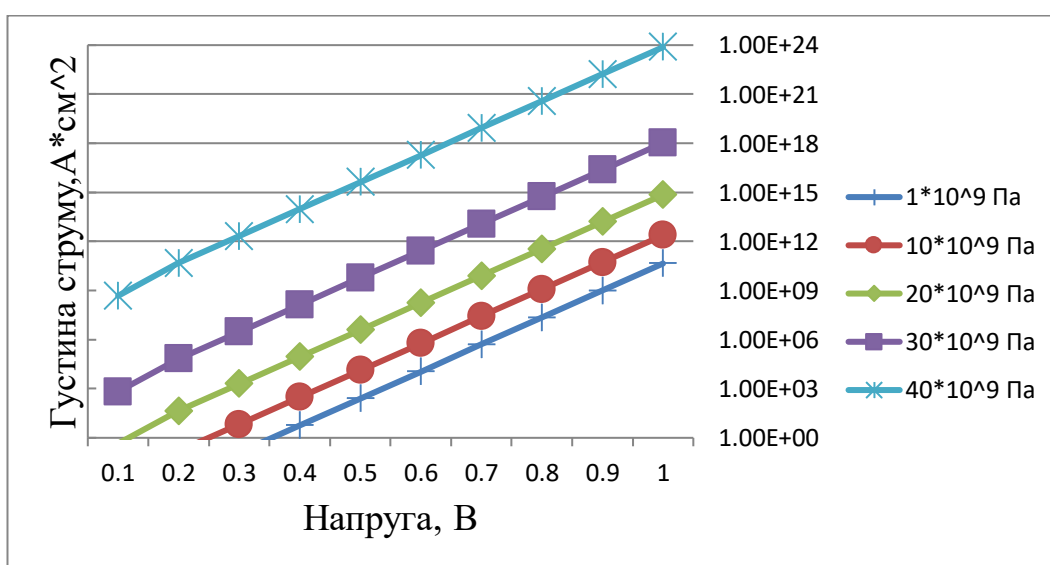


Рисунок 2.7 – Залежність густини струму від дії тиску та прикладеної напруги

ВАХ при прямому зміщенні зі збільшенням тиску змінюється таким чином, що різке збільшення струму спостерігається навіть при малій напрузі прямого зміщення. При тиску, близькому до межі пружності, значення струму зростає до такого, яке в реальній ситуації стане причиною незворотних змін в р-п переході.

Окрім того, таке різке збільшення струму збільшить потужність, яка виділятиметься на р-п переході, що стане причиною збільшення температури та, як наслідок, зміни параметрів компонента.

Отримані значення для р-п переходу характерні як для діодів, так і для транзисторів, оскільки фізика процесів однакова. Основним фактором, що впливатиме на значення вихідних струмів під дією тиску, є початкова концентрація неосновних носіїв у напівпровіднику – чим вона більша, тим більше зміниться струм.

2.7. Перевірка адекватності розробленої моделі

Модель вважається адекватною, якщо результати її роботи відповідають теоретичним даним. Адекватні моделі характеризуються ступенем точності, який визначається відношенням експериментально отриманих даних до даних, отриманих при використанні моделі. В реальному житті експериментальні дані не завжди збігаються з модельованими. Це пояснюється впливом похибок методів вимірювання та експериментального обладнання, що використовується для отримання експериментальних даних. Похибка моделей визначається початковими умовами та певними спрощеннями, які використовуються при розрахунках.

Розроблену модель можна вважати адекватною, оскільки розраховані значення збігаються з теоретичним очікуванням та вірно описують фізику процесів впливу.

Для перевірки точності змодельованих даних проведено експериментальне вимірювання характеристик інтегральних компонентів

біполярної мікросхеми, а саме опір резистора та вихідні струми діода. Розрахунки проводились з використанням програми MATLAB R2016a.

Оскільки формули, які використовуються при розрахунках, не враховують особливостей технології виготовлення інтегральних приладів, їх реальних розмірів та особливостей використання, вирішено спростити розрахунок. Це має зменшити похибку, яка залежить від вказаних вище особливостей виготовлення, округлень і спрощень, які застосовуються при обчисленні стандартними формулами. Отож, з урахуванням усього вище сказаного, зміну характеристики під дією тиску можна описати формулою (34):

$$A_p = A_0 \times e^x, \quad (34)$$

де A_p – значення параметра при дії тиску, A_0 – початкове значення параметра, x – зміна ширини забороненої зони під дією відповідного тиску.

Опір резистора складає 100 Ом, струми вимірюються при напрузі прямого зміщення 0,3 В. Максимальний вихідний струм обмежено до 30 мА. Вимірювання проводились за допомогою стенду, описаного вище.

Результати експериментального випробування показані в таблиці 2.19. Вимірювання проводилось у 3 ітерації з поетапним збільшенням тиску для перевірки точності вимірювання.

На основі отриманих даних побудовано графіки, зображені на рисунках 2.8-2.9. При побудові графіків значення, отримані за допомогою стенду, усереднювались.

Таблиця 2.19 – Результати експериментальної перевірки

Параметри	Стенд				Модель			
Тиск, ГПа	0	10	20	25	0	10	20	25
Опір резистора, Ом	100	0,187	$6,25 \times 10^{-4}$	$3,75 \times 10^{-5}$	100	0,184	$6,3 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-5}$
	100	0,184	$6,3 \times 10^{-4}$	$3,76 \times 10^{-5}$				
	100	0,187	$6,37 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-5}$				
Вихідний струм діода, А	$3,6 \times 10^{-9}$	$2,51 \times 10^{-6}$	$7,7 \times 10^{-4}$	0,021	$3,5 \times 10^{-9}$	$2,55 \times 10^{-6}$	$7,71 \times 10^{-4}$	0,022
	$3,65 \times 10^{-9}$	$2,58 \times 10^{-6}$	$7,69 \times 10^{-4}$	0,023				
	$3,61 \times 10^{-9}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$7,73 \times 10^{-4}$	0,021				

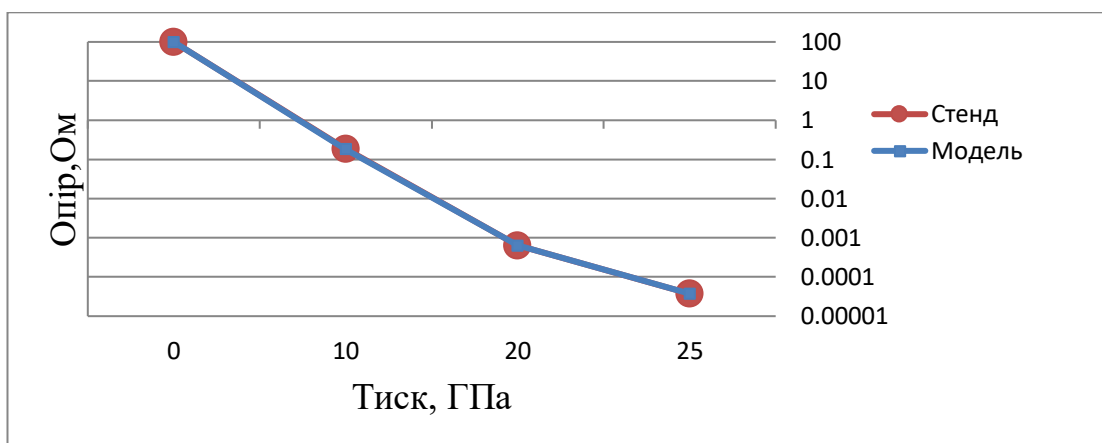


Рисунок 2.8 – Експериментальні значення опору

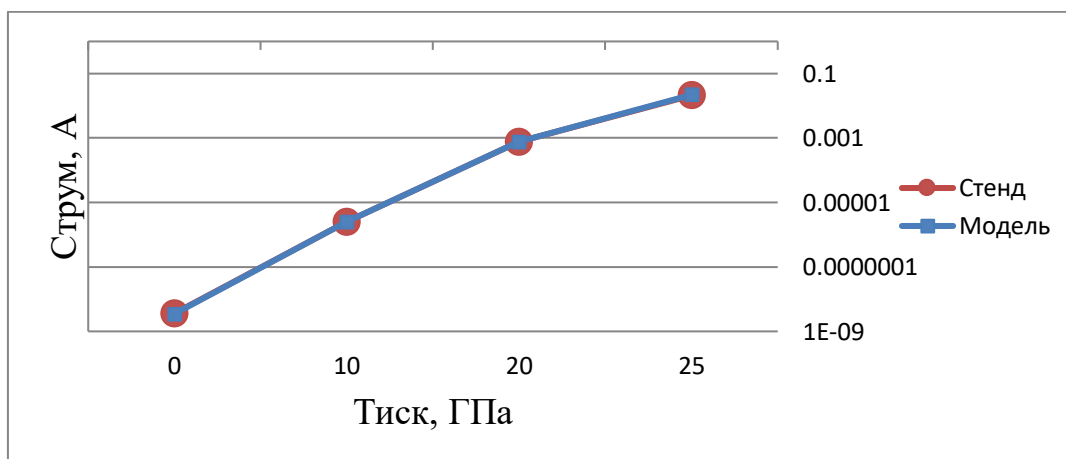


Рисунок 2.9 – Експериментальні значення вихідного струму діода

Також слід зазначити, що при вимірюванні стендом діяло обмеження по максимальному вихідному струму, яке складає 30 мА. Це пов'язано з впливом саморозігріву на параметри діоду, внаслідок якого значення струму змінюється. Математична модель таких обмежень не має. Розрахунки проводились для тиску до 25 ГПа включно, оскільки при тиску більшому вказаного, значення параметрів змінюються на стільки, що у випадку резистора опір стає меншим, ніж мінімально можливе вимірюване значення для мультиметра, а у випадку діода – струм перевищує вказане обмеження по вихідному струму.

Як видно з результатів експериментального дослідження, показники, отримані за допомогою стенду, відповідають змодельованим. Відносна похибка вимірювання для опору і напруги у стенда складає 0,4 %. З графіків видно, що експериментально отримані дані відповідають змодельованим, що свідчить про високу точність моделі. В середньому відносна похибка моделі до стенду при вимірюванні склала 2,3 %.

Висновки по розділу 2

Розроблено та перевірено математичні моделі впливу тиску на характеристики компонентів інтегральних мікросхем. Моделі реалізують розрахунок зміни опору кремнієвого резистора від тиску та зміну вихідного струму діода і транзистора. Аналіз формул, на основі яких розроблено моделі, показав, що вплив тиску зменшує ширину забороненої зони, внаслідок чого збільшується концентрація неосновних носіїв заряду. Зменшення опору пояснюється зменшенням ширини забороненої зони. Оскільки струм р-п переходу визначається концентрацією неосновних носіїв у кожній області, то відповідне збільшення концентрації спричиняє збільшення струму.

Досліджено і показано, що існуюча залежність зміни ширини забороненої зони під дією тиску є неточною і не відповідає реальним даним.

Тож для визначення даної залежності розроблено та перевірено нову формулу, яка визначає уточнюючі коефіцієнти для існуючої залежності. Всі подальші розрахунки проведені з урахуванням отриманих коефіцієнтів. Для перевірки дослідження проводилось з пасивним та активним елементом. Це необхідно для того, щоб виключити з результатів вплив особливостей технологічних процесів виготовлення компонентів.

Досліджено і показано, що коефіцієнт підсилення струму біполярних транзисторів не залежить від дії тиску. Зміни зазнають лише вхідні та вихідні струми. Дослідження проводилось експериментальним шляхом, з використанням спеціального стенду.

Перевірка розроблених моделей показала, що результати розрахунків відповідають теоретичному сподіванню, що свідчить про достовірність моделі. Проаналізувавши отримані дані виявлено, що зміна ширини забороненої зони найбільше впливає на концентрацію неосновних носіїв. Також зміна ширини впливає на ефективну масу та час життя носіїв заряду, але такий вплив настільки малий, що при розрахунках прийнято цими змінами нехтувати. Результати дослідження свідчать про те, що зміна опору і струму відбувається за експоненціальним законом таким чином, що чим більший тиск, тим більша ступінь зміни параметру.

Усі розрахунки проводились з використанням програми MATLAB R2016a. Це високорівнева мова та інтерактивне середовище для програмування, чисельних розрахунків і візуалізації результатів.

Підтвердження адекватності моделі проводилось за допомогою експериментальних вимірювань з використанням спеціального стенду. Точність вимірювання стендом складає 0,4 %. Для збільшення точності вимірювання проводились декілька разів. Але наявність людського фактора вносить свою похибку і це необхідно враховувати. Порівняльний аналіз результатів вимірювання стендом та розрахованих даних вказує на адекватність моделі, оскільки розподіл значень відбувається за експоненціальним законом як в стендових вимірюваннях, так і модельованих.

Відносна похибка моделі склала 2,3 %, що свідчить про точність розробленої моделі. Якщо кількість вимірювань збільшити та не використовувати обмеження при розрахунках, то відносну похибку можна зменшити. Отримана точність моделі достатня для розуміння основних тенденцій змін характеристик напівпровідника під дією тиску і дозволяє проводити симуляції для дослідження впливу тиску на електричні характеристики біполярних мікросхем.

РОЗДІЛ 3. СИМУЛЯЦІЯ ВПЛИВУ ТИСКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БІПОЛЯРНИХ ІМС АВТОМОБІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ ТАКОГО ВПЛИВУ

Розділ 3 присвячений визначенню впливу тиску на характеристики біполярних мікросхем автомобільної промисловості та розробці процедури аналізу впливу тиску на вихідні характеристики, розрахунку коефіцієнтів чутливості вихідних параметрів у залежності від зміни характеристик компонентів біполярних ІМС.

Визначення впливу тиску проводитиметься шляхом аналізу даних, отриманих за допомогою симуляції, що проводитиметься з використанням програм схмотехнічного аналізу, шляхом зміни характеристик компонентів на основі даних, отриманих у попередньому розділі. Проаналізувавши отримані дані можна визначити коефіцієнти чутливості, які визначають зміну вихідних параметрів мікросхеми в залежності від зміни характеристик активних і пасивних компонентів мікросхеми.

На основі даних симуляції буде розглянуто технологічні, конструктивні та схмотехнічні методи компенсації впливу тиску, а також проаналізовано їх ефективність.

3.1. Процедура аналізу впливу тиску на вихідні характеристики ІМС

Суть процедури полягає у визначенні характеру зміни вихідних характеристик мікросхеми, шляхом її дослідження за допомогою схмотехнічного аналізу. З попереднього розділу відомо як змінюються характеристики резисторів та біполярних діодів і транзисторів. Використовуючи готові моделі компонентів мікросхеми і знаючи вплив тиску на характеристики останніх можна провести схмотехнічний аналіз з урахуванням впливу тиску. В такому випадку набором вхідних параметрів

будуть характеристики компонентів за нормальних умов (без впливу тиску), та їх характеристики при дії тиску від 1 ГПа до 5 ГПа. Такого діапазону буде достатньо для аналізу зміни вихідних параметрів мікросхеми.

На підставі отриманих вихідних значень визначаються коефіцієнти чутливості, а також вплив тиску на зміну вихідних параметрів мікросхеми. Ці коефіцієнти відображають залежність зміни вихідних параметрів від зміни характеристик компонентів під дією тиску. Проаналізувавши одержані коефіцієнти можна визначити ступінь чутливості вихідних параметрів мікросхеми до зміни характеристик одного чи групи компонентів.

Використовуючи отримані дані можна перевірити ефективність різних методів компенсації впливу тиску. Процедура аналізу показана на рисунку 3.1.

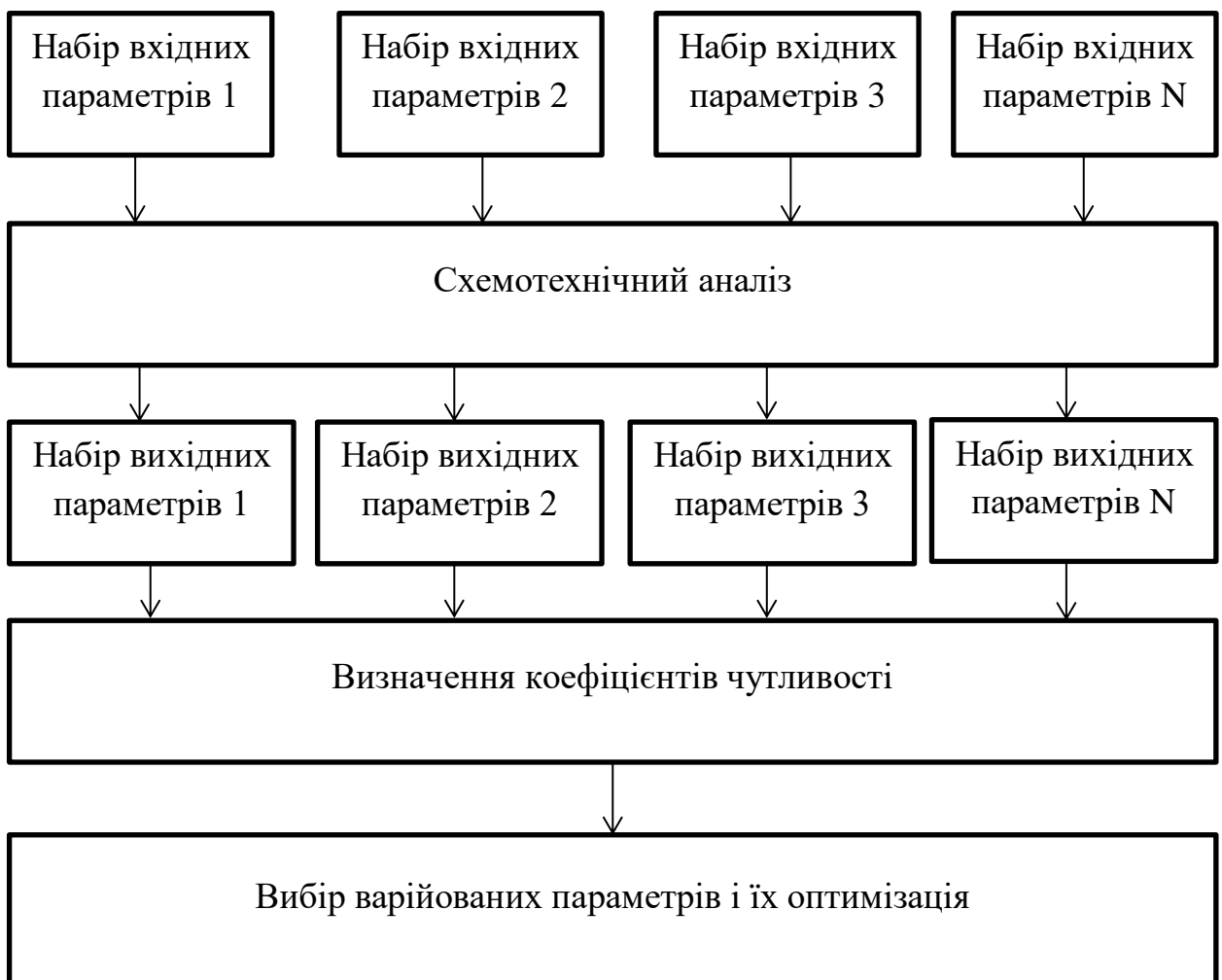


Рисунок 3.1 – Процедура аналізу впливу тиску на вихідні характеристики ІМС

Набір вхідних параметрів визначає значення характеристик компонентів мікросхеми під дією тиску. В подальшій перевірці кількість таких параметрів буде шість ($N=6$). Це значення параметрів без дії тиску та при дії тиску в 1 ГПа, 2 ГПа, 3 ГПа, 4 ГПа та 5 ГПа. Такої кількості вхідних наборів даних достатньо для визначення впливу тиску, та розрахунку коефіцієнтів чутливості.

Під схемотехнічним аналізом розуміється симуляції роботи електричної схеми з урахуванням наборів вхідних параметрів. Даний аналіз проводитиметься з використанням програми OrCAD 16. Це універсальне середовище для проектування і створення електричних схем та їх моделювання.

Набором вихідних параметрів є результати схемотехнічного моделювання мікросхеми, значення її вихідних характеристик, з урахуванням вхідних параметрів.

На основі отриманих вихідних даних розраховується коефіцієнт чутливості. Даний коефіцієнт в загальному визначає швидкість зміни вихідного параметру в залежності від зміни характеристик компонентів, що визначають вихідну характеристику. В програмі OrCAD такий коефіцієнт розраховується за допомогою вбудованого пакету функцій і визначає як зміниться вихідна характеристика мікросхеми в залежності від зміни параметрів, що визначають вихідну характеристику. Тобто визначає як зміна характеристики конкретного компонента ІМС впливає на вихідну характеристику.

Вибір варійованих параметрів і їх оптимізації необхідні для визначення таких оптимальних характеристик компонентів ІМС, які б стабілізували вихідні характеристики мікросхеми на необхідному рівні. Проте, в цьому пункті немає сенсу, оскільки навіть при найменшому впливі тиску зміна вихідних параметрів така, що зменшити її підбором різних конфігурацій параметрів активних і пасивних компонентів неможливо.

3.2. Вибір мікросхеми автомобільної електроніки та її вихідних параметрів для дослідження впливу тиску

Під час схемотехнічного аналізу буде використовуватися мікросхема, яка слугує для діагностики та обробки сигналів ємнісних датчиків для подальшого перетворення в необхідну аналогову величину. ІМС такого призначення застосовуються в автомобільній промисловості для обробки сигналів з датчиків тиску, температури, струму та датчиків Холла. Отримані дані, після обробки таким інтерфейсом, передаються на електронний блок керування автомобілем для контролю температури і обертів двигуна, контролю моменту запалення, тиску в шинах і інших процесів роботи різних систем автомобіля.

Особливістю таких мікросхем є їхня цифро-аналогова структура. Тому мають місце як біполярні транзистори для реалізації операційних підсилювачів, стабілізаторів живлення, АЦП та ЦАП, так і блоки цифрової обробки на КМОП транзисторах. Приклад архітектури такої мікросхеми наведений на рисунку 3.2.

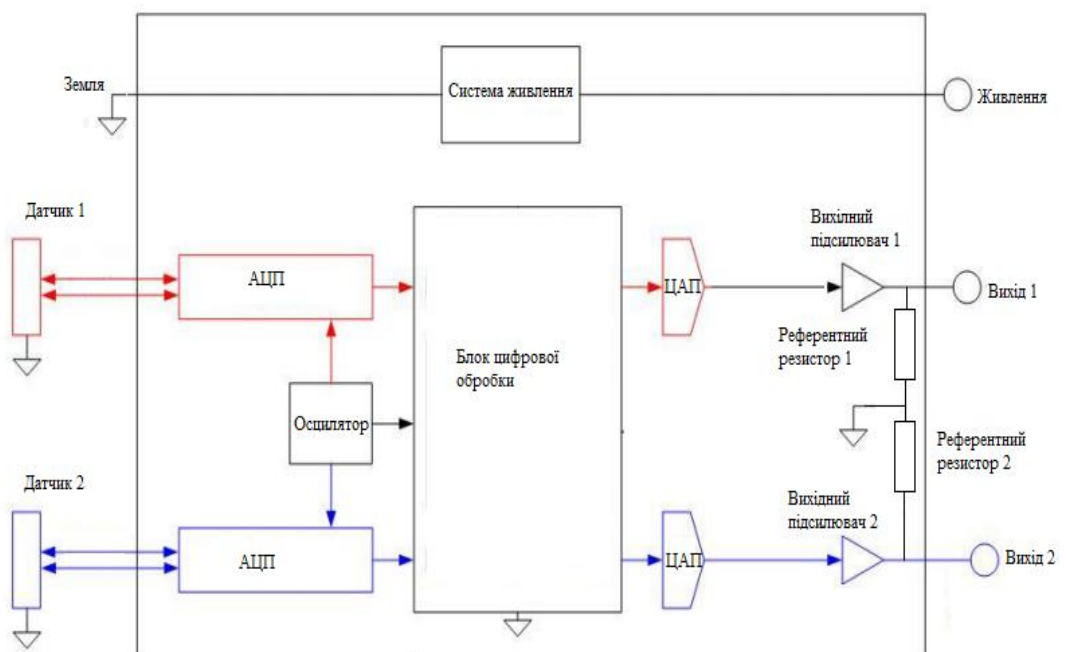


Рисунок 3.2 – Архітектура досліджуваної мікросхеми

Вихідними параметрами, що будуть досліджуватися, є напруга аналогових виходів мікросхеми (Вихід 1 і Вихід 2). Також доцільно розглянути значення струму споживання мікросхеми, вихідний струм підсилювача, вихідну напругу цифро-аналогового перетворювача і опір референтного резистора.

Напруга живлення мікросхеми складає 5 В, струм споживання 50 мА. Значення аналогових виходів мікросхеми може змінюватися в залежності від вхідних даних з датчиків у діапазоні від 0,2 В до 4,9 В.

3.3. Результати схемотехнічного аналізу

Аналіз проводився за допомогою SPICE моделі вказаної мікросхеми. Така симуляція є загальноприйнятою в напівпровідниковій промисловості для верифікації роботи схеми на транзисторному рівні. Особливістю такої моделі є те, що вона містить повний опис усіх параметрів компонентів ІМС, тобто номінали резисторів, вихідні струми колекторів транзисторів, їх коефіцієнти підсилення і опори переходів, тощо. Сама модель поділяється на макромоделі усіх блоків мікросхеми, що дає змогу провести симуляцію окремо для кожного конкретного блоку. Для симуляції обрано блоки підсилювача, ЦАП і джерела живлення.

При симулюванні вважалося, що значення напруги аналогового виходу становить 2,5 В. Досліджувалися зміни значення струму споживання мікросхеми, напруги аналогового виходу мікросхеми, струму виходу підсилювача та значення опору референтних резисторів, які утворюють вихідну напругу. Окрім значень тиску, вхідними параметрами також є зміна опору резисторів, вихідного струму колекторів транзисторів та зміна опору їх переходів, а також зміна вихідного струму діодів під дією тиску. Результати симуляції занесені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати симуляції

Тиск, ГПа	0	1	2	3	4	5
Вихідний струм джерела живлення, мА	50	73,28	178,19	310,54	521,7	789,11
Напруга аналогового виходу, В	2,5	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Вихідний струм підсилювача, мА	0,1	4,81	9,41	18,21	34,81	47,15
Вихідна напруга ЦАП, мВ	13	28,17	44,78	79,65	101,15	141,8
Опір референтного резистора, КОм	25	17,8	1,28	0,51	0,219	0,182

Для наочності отриманих даних побудовано графіки, які зображені на рисунках 3.3 – 3.7.

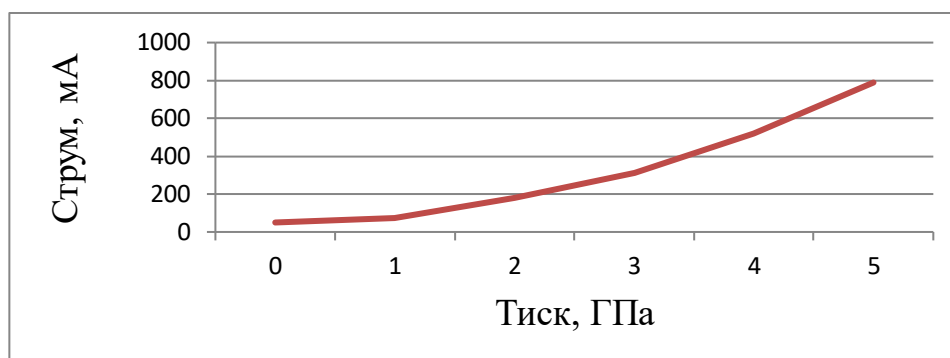


Рисунок 3.3 – Залежність струму споживання мікросхеми від тиску

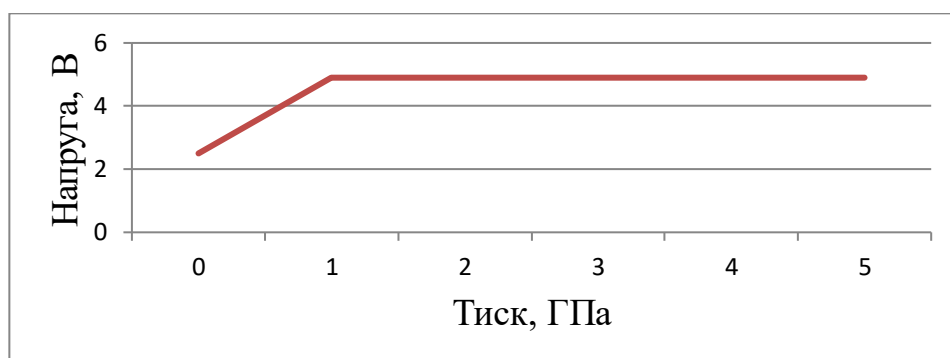


Рисунок 3.4 – Залежність напруги аналогового виходу мікросхеми від тиску

Як видно з наведеного вище рисунку, напруга аналогового виходу різко виходить у своє максимальне значення під дією тиску. Це пояснюється значним збільшенням струму, ступінь зміни якого більше, ніж ступінь зміни опору. Тобто струм зростає сильніше, ніж зменшується опір.

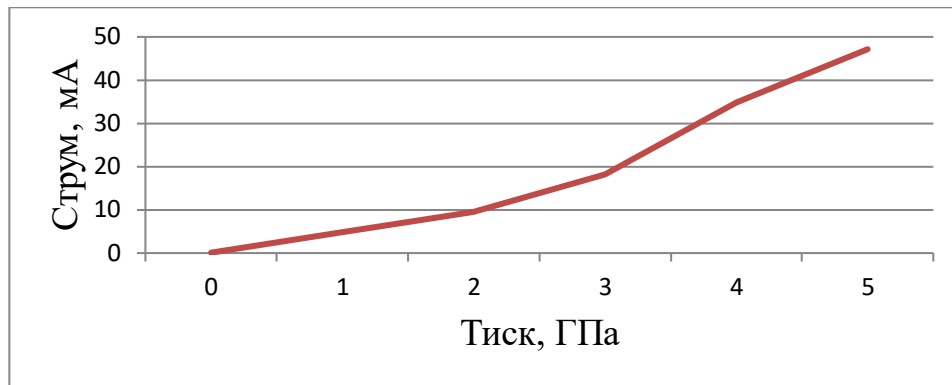


Рисунок 3.5 – Залежність вихідного струму підсилювача від тиску

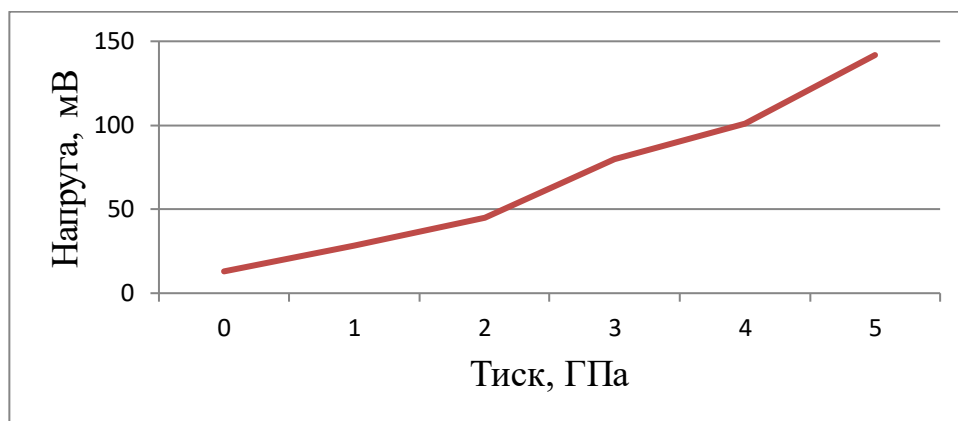


Рисунок 3.6 – Залежність вихідної напруги ЦАП від тиску

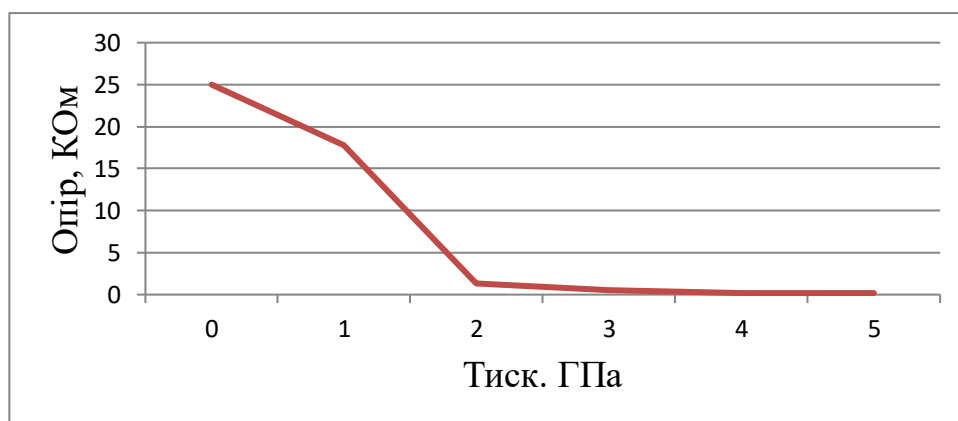


Рисунок 3.7 – Залежність опору референтного резистора від тиску

Згідно з вимогами до мікросхеми, зміна напруги аналогового виходу не має перевищувати 1%. Відсоткова зміна значення напруги аналогового виходу мікросхеми показана в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Відсоткова зміна параметру

Тиск, ГПа	1	2	3	4	5
Напруга аналогового виходу, %	96				

З наведених вище даних видно, що дія тиску призводить до критичної зміни параметра. Це є недопустимим для подальшого використання мікросхеми.

На основі даних з (табл.3.1) розраховано коефіцієнти чутливості зміни характеристики вихідних параметрів схеми в залежності від зміни параметрів компонентів. Такими компонентами є резистори, транзистори та діоди. Розрахунок проводився окремо для ЦАП, стабілізатора живлення та підсилювача, а також для усієї мікросхеми. На результат розрахунку впливає кількість компонентів у блоці. Для розрахунку використовувався вбудований пакет функцій OrCAD. Коефіцієнти чутливості обчислюються наступним чином: визначається діапазон зміни характеристики конкретного компоненту (наприклад опір резистора), програма проводить схемотехнічний аналіз усієї мікросхеми з урахуванням зміни характеристики усіх обраних компонентів і визначає ступінь зміни значення вихідного параметру мікросхеми в залежності від зміни кожного конкретного обраного компоненту. Тобто, наприклад, як зміна кожного резистора впливає на загальну зміну вихідного параметру.

Отримані коефіцієнти чутливості залежності напруги аналогового виходу мікросхеми від зміни компонентів наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнт чутливості напруги аналогового виходу

Тиск, ГПа		1	2	3	4	5
Коефіцієнт	Транзистор	1,29	1,376	1,462	1,548	1,634
	Резистор	0,43	0,387	0,34	0,301	0,258
	Діод	0,24	0,197	0,158	0,111	0,068

З наведених вище даних видно, що при збільшенні дії тиску визначальною стає зміна параметрів транзисторів. Це пояснюється тим, що ступінь зміни вихідного струму під дією тиску більший, ніж ступінь зміни опору резистора. Початковий малий коефіцієнт впливу діода пояснюється схемотехнічними особливостями мікросхеми, кількість транзисторів набагато більша, ніж кількість резисторів і діодів.

Аналогічним чином розраховано значення коефіцієнтів чутливості для вихідного струму джерела живлення та підсилювача, а також для вихідної напруги ЦАП.

Принципову схему джерела живлення мікросхеми представлено на рисунку 3.8. На основі цієї схеми проведено розрахунок коефіцієнту чутливості зміни вихідного струму від зміни параметрів компонентів. Отримані результати показані в таблиці 3.4.

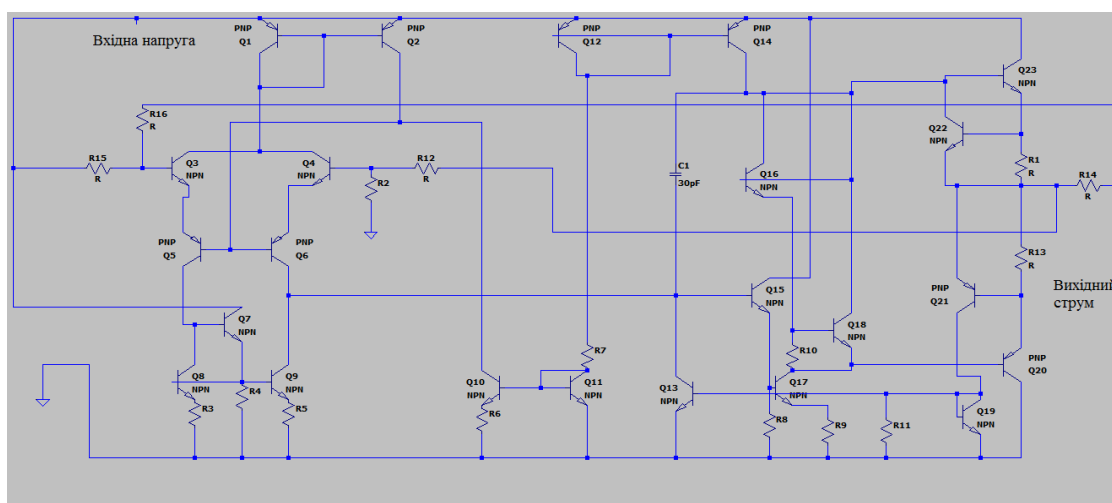


Рисунок 3.8 – Принципова схема джерела струму мікросхеми

Таблиця 3.4 – Коефіцієнт чутливості для джерела струму

Тиск, ГПа		1	2	3	4	5
Коефіцієнт	Транзистор Q22	0,876	1,136	3,726	4,04	6,836
	Резистор R15	0,128	0,98	1,01	1,28	1,96

У наведеній вище таблиці вказані коефіцієнти компонентів, які найбільше впливають на вихідну характеристику джерела. Такими виявились резистор R15 та транзистор Q22. Останній визначає вихідний струм джерела, а зміна цього струму під тиском окреслює зміну досліджуваної характеристики, тому його коефіцієнт чутливості є найбільшим.

Принципову схему вихідного підсилювача мікросхеми показано на рисунку 3.9. На основі цієї схеми проведено розрахунок коефіцієнту чутливості зміни вихідного струму від зміни параметрів компонентів. Отримані результати показані в таблиці 3.5.

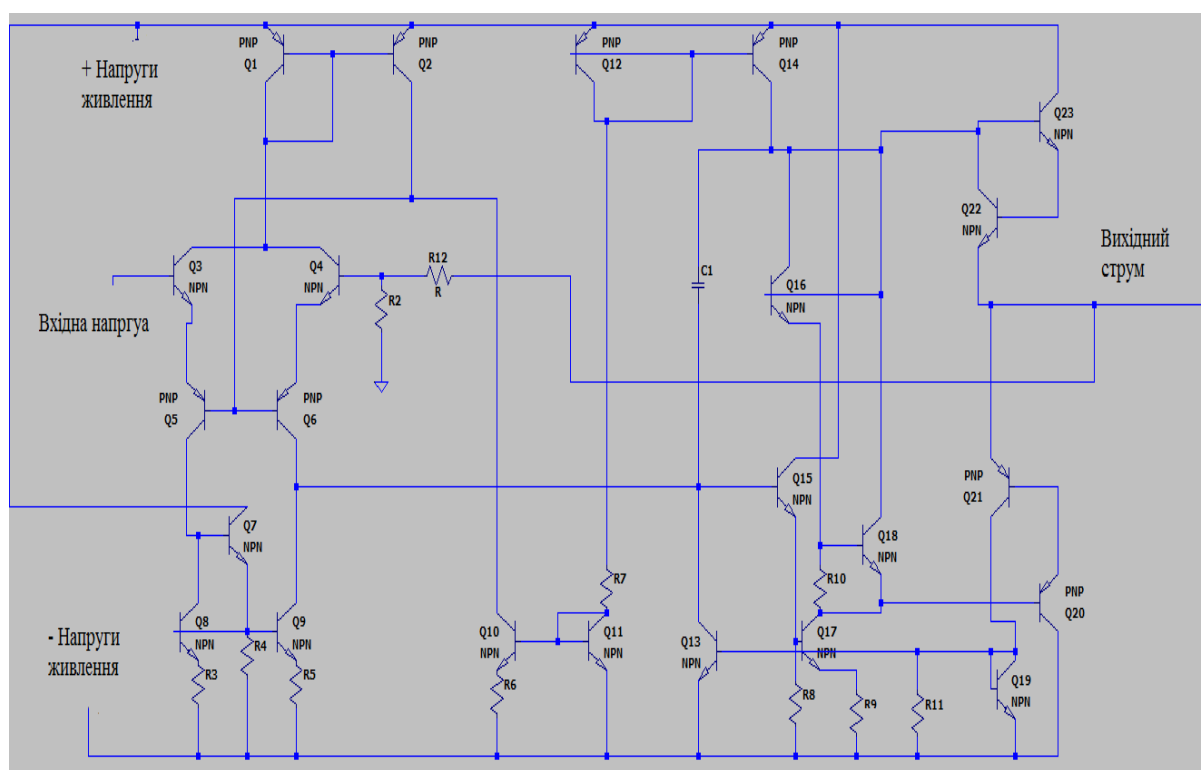


Рисунок 3.9 – Принципова схема вихідного підсилювача

Таблиця 3.5 – Коефіцієнт чутливості для вихідного підсилювача

Тиск, ГПа		1	2	3	4	5
Коефіцієнт	Транзистор Q22	21,628	37,631	69,515	109,251	221,356
	Резистор R2	1,489	8,819	12,415	21,265	89,218

У наведеній вище таблиці вказані коефіцієнти компонентів, які найбільше впливають на вихідну характеристику джерела. Такими виявились резистор R2 та транзистор Q22. Останній визначає вихідний струм підсилювача. З отриманих даних видно, що зміна параметрів транзисторів змінює вихідну характеристику більше, ніж зміна опору резисторів. Це пояснюється схемотехнічними особливостями підсилювача, а саме більшою кількістю транзисторів, порівняно з кількістю резисторів.

Принципова схема ЦАП наведена на рисунку 3.10. На основі цієї схеми проведено розрахунок коефіцієнту чутливості зміни вихідного струму від зміни параметрів компонентів. Отримані результати показані в таблиці 3.6.

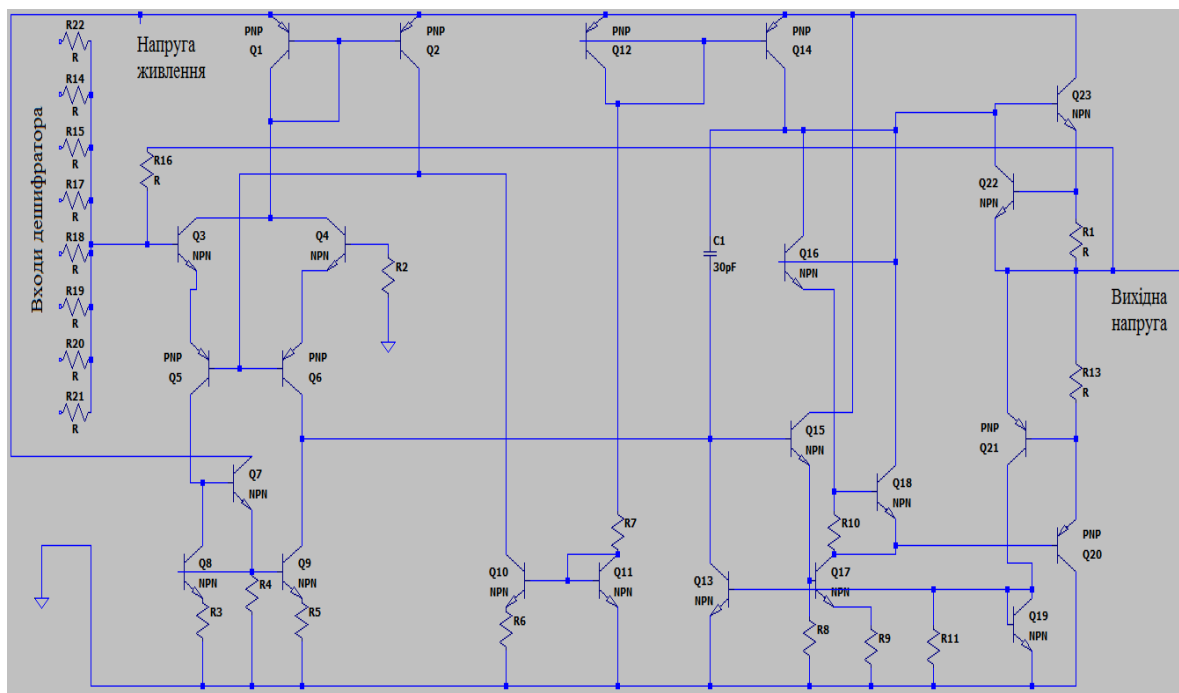


Рисунок 3.10 – Принципова схема ЦАП

Таблиця 3.6 – Коефіцієнт чутливості для вихідного підсилювача

Тиск, ГПа		1	2	3	4	5
Коефіцієнт	Транзистор Q22	0.25	0.28	0.36	0.51	0.78
	Резистори R14, R15, R17-22	0.78	0.81	0.98	1.34	2.29

У таблиці 3.6 вказані коефіцієнти компонентів, які найбільше впливають на вихідну напругу ЦАП. Такими виявились резистори R14, R15, R17-22 та транзистор Q22. З отриманих даних видно, що зміна параметрів опору резисторів має більший вплив на вихідну характеристику, ніж зміна емітерного струму транзисторів. Це пояснюється схемотехнічними особливостями ЦАП.

3.4. Методи компенсації впливу тиску на характеристики ІМС

Методи компенсації впливу тиску – це певні структурні зміни, які необхідно внести в мікросхему або її корпус для зменшення або повного виключення впливу тиску на вихідні характеристики останньої. Існуючі методи зображено на рисунку 3.11.

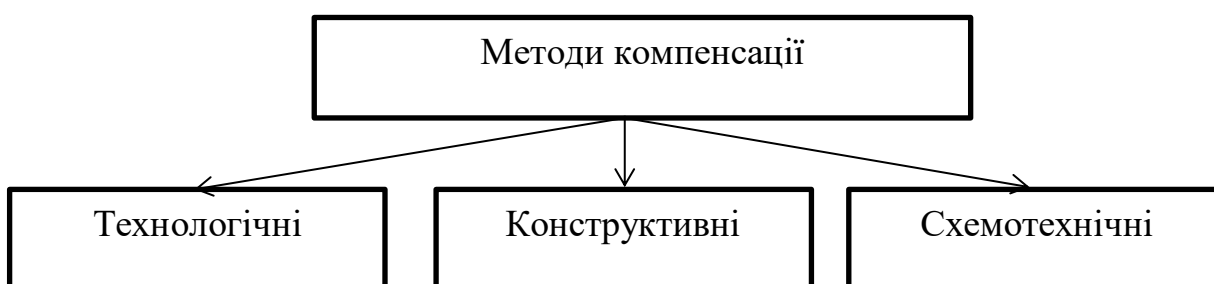


Рисунок 3.11 – Методи компенсації впливу тиску

Для технологічних методів характерні зміни, пов'язані з механізмом виготовлення кристалу ІМС, а саме з планарною технологією.

Як відомо з попередніх розділів, причиною зміни опору кремнієвих резисторів є зміна ширини забороненої зони. Безпосередньо ширина забороненої зони визначається величиною зв'язку між атомами і не залежить від кількості атомів у кристалі. Тобто ширина залежить лише від матеріалу і є унікальним значенням для кожного окремого напівпровідника. Проте, вона залежить від зовнішніх факторів, таких як температура, тиск, магнітні та гравітаційні поля. Єдиний спосіб, яким можна штучно змінити ширину забороненої зони – це внесення дефектів у кристалічну решітку, що змінить величину зв'язку між атомами. Але слід розуміти, що внесення дефектів у кристалічну решітку призведе до зміни усіх електричних характеристик матеріалу. На сьогоднішній день не існує методів контрольованої зміни структури кристалічної решітки кремнію, тому технологічно немає можливості змінити ширину забороненої зони, і як наслідок, компенсувати вплив тиску на кремнієві резистори [34].

Зміна вихідних струмів діодів та транзисторів підпорядкована однакової фізиці процесу. Під дією тиску зміна струму визначається не лише зміною ширини забороненої зони, а також збільшенням концентрації неосновних носіїв струму, які і визначають зміну струму. Якщо ширину забороненої зони неможливо фізично змінити, то збільшення концентрації неосновних носіїв можна зменшити за допомогою рекомбінації через локальні домішкові рівні. Особливістю цього типу рекомбінації є те, що електрони переходять із зони провідності в валентну зону через локальні енергетичні рівні, розташовані в забороненій зоні напівпровідника. Крім того, завдяки вибору типу домішкових атомів з'являється можливість керувати часом життя носіїв заряду в напівпровіднику. Таким чином, якщо створити в товщі забороненої зони рекомбінаційні пастки, є ймовірність зменшити кількість неосновних носіїв, які перейдуть з валентної зони в зону провідності, й тим самим зменшити значення вихідного струму. Такий тип пастки може рекомбінувати з різно зарядженими носіями [35].

Також існує інший тип пастки захоплення. Він відрізняється від попереднього лише тим, що орієнтований на конкретний тип неосновного носія, тобто для р- або n-типів [35].

Таким чином, створення штучних рекомбінаційних центрів у товщі забороненої зони є реальним способом зменшення вихідного струму компонентів. Проте, слід розуміти, що використання такого способу зменшить вихідний струм і в недеформованому напівпровіднику, а для його збільшення доведеться підвищувати концентрацію домішок в кремнії. Підняти концентрацію домішок можна лише до значення, яке визначається розчинністю домішки в матеріалі. Таким чином необхідного вихідного струму можна і не отримати через вказане вище обмеження, тому подібний спосіб можна використовувати лише для компонентів з малими значеннями вихідних струмів.

Також до технологічних методів можна віднести заміну дифузійних резисторів на плівкові, або повний перехід на дискретні резистори. Проте слід розуміти, що в реальних умовах не завжди є змога замінити усі внутрішні резистори на дискретні, це значно ускладнює процес виготовлення мікросхеми і збільшує площу, яку займатиме такий блок. Перехід на плівкові резистори є реальним способом компенсації впливу тиску на опір. Резистори мають таку саму форму і розміри, як і резистори, виготовлені за дифузійною технологією та забезпечують відтворення усіх необхідних номіналів з відповідним допуском [5, 6].

До конструктивних методів компенсації відносяться способи корпусування кристалів мікросхем і матеріалів, які використовуються для цього. У якості матеріалу для корпусування кристалів використовують пластик і кераміку. На сьогоднішній день найпопулярніші типи корпусів показано на рисунку 3.12.

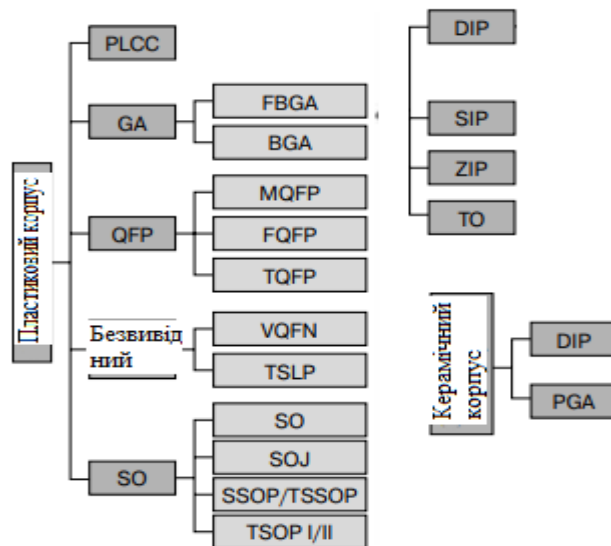


Рисунок 3.12 – Найпопулярніші типи корпусів

Як зазначалось у попередніх розділах, основною причиною впливу тиску на кристал мікросхеми в корпусі є результат процесу деламінації, внаслідок якої виникають локальні деформації в підкладці кристалу, що призводить до появи локального тиску. Деламінація виникає з плином часу і може пришвидшуватись при дії підвищеної вологості та перепадів температур. Для захисту від впливів зовнішнього середовища використовують пластикові і керамічні корпуси, пластик є дешевшим та еластичнішим матеріалом, що дає змогу виготовлювати різні форми корпусів. Керамічні корпуси дорожчі і мають обмеження по формі корпусу (DIP і PGA), характеризуються вищим ступенем захисту кристалу від впливу зовнішнього середовища. Проте, через високу вартість корпусування такі мікросхеми використовуються у військовій і аерокосмічній промисловостях [36].

Так як пластик є дешевим та доступним матеріалом, то пластикові корпуси застосовують у всіх галузях використання ІМС . Параметром, що визначає ступінь захисту кристалу від зовнішнього середовища є зернистість матеріалу. Чим вона менша, тим ступінь захисту більший [36].

Таким чином, за допомогою використання керамічного корпусування можна значно зменшити ймовірність виникнення процесу деламінації всередині корпусу, проте таке використання є не досить практичним і може збільшити кінцеву ціну мікросхеми. Використання дрібнозернистого пластику є раціональнішим порівняно з керамічними корпусами. Вони є більш практичними і дають змогу виготовляти корпуси різної форми.

На сьогоднішній день як підкладку при корпусуванні мікросхем використовують декілька матеріалів, до яких належить склоепоксидний композит та кераміка. Для кожного з цих матеріалів існує відповідний спосіб монтажу. До таких методів монтажу відносять контактно-реактивну пайку, використання евтентичних сплавів, клеєві композиції та закріплення на двосторонню клейку стрічку [37, 38].

Слід зазначити, що на сьогоднішній день майже не використовують методи пов'язані з пайкою, такі як контактно-реактивний та евтентичний, через небажаний вплив, який зазнає кристал при такому методі закріплення.

Серед матеріалів найпопулярнішим є склоепоксидний, він забезпечує універсальність форми підкладки і простоту використання. Матеріал представляє собою текучу суміш епоксидних смол, які твердіють під дією ультрафіолету. Недоліком такого матеріалу є виникнення порожнин при твердінні, які неможливо виправити, що в подальшому може стати причиною деламінації. Для закріплення кристалу на таку підкладку використовуються методи клеєного закріплення або посадки на двосторонню клейку стрічку [38].

Використання як матеріалу підкладки з кераміки забезпечить найбільшу стійкість до деламінації. Проте, застосування такого матеріалу пов'язане зі збільшенням ціни виготовлення мікросхеми. Для закріплення кристалу на таку підкладку використовуються усі вказані вище методи, серед яких найпопулярнішими є – клеєне закріплення і посадка на двосторонню клейку стрічку.

Новітнім способом закріплення кристалу на підкладці є закріплення за допомогою двосторонньої клейкої стрічки. Цей метод може знівелювати вплив делямінації на кристал мікросхеми через свої амортизуючі властивості [39].

Для забезпечення найменшої ймовірності виникнення процесів делямінації доцільно використовувати керамічну підкладку та закріплювати на ній кристал за допомогою двосторонньої клейкої стрічки. Така стрічка знівелює вплив делямінації підкладки через свої амортизаційні властивості. А якщо створити навколо кристалу певну порожнину, то можна повністю виключити вплив тиску при делямінації. Проте, слід розуміти, що внаслідок вказаного вище процесу, наявність порожнини при дії тиску може спричинити зсув кристалу відносно початкової позиції. Внаслідок такого зсуву ймовірно руйнування контактів між кристалом та корпусом.

Також одним із методів конструктивної компенсації є зміна топологічного розміщення компонентів на кристалі. Прикладом такої зміни може бути переміщення компоненту, найбільш чутливого до тиску з периферії кристалу до центру, або зміна форми резистора – з продовгуватого на зіркоподібний. Цей спосіб може забезпечити захист конкретного компоненту від дії тиску, але це ймовірно лише при локально невеликій площі дії тиску. Також неможливо визначити наперед в якій саме області буде діяти тиск. А зміна топології мікросхеми значно збільшує час проектування і може стати причиною збільшення площі кристалу, що не відповідає тенденціям сучасного ринку мікроелектроніки. Такий метод може бути ефективним у конкретній ситуації, але не підходить для масового застосування.

До схемотехнічних методів компенсації відносять такі зміни принципів схем мікросхеми, які забезпечать виключення впливу тиску на характеристики ІМС. Цей метод характеризується зміною схем включення компонентів у принциповій схемі таким чином, щоб забезпечити певний зворотній зв'язок вихідного параметру з характеристикою компоненту.

Найпоширенішими схмотехнічними методами стабілізації струму є схеми ґруновані на використанні негативного заворотного зв'язку. Приклад таких схем показано на рисунку 3.13.

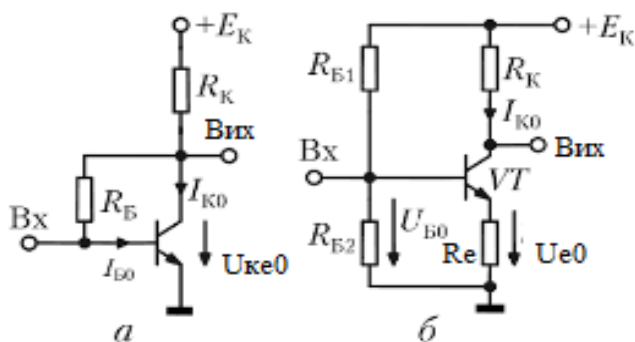


Рисунок 3.13 – Схеми стабілізації струму

На наведеному вище рисунку схема а – колекторна стабілізація струму; б – емітерна стабілізація струму.

Схема колекторної стабілізації реалізує негативний зворотній зв'язок по напрузі з використанням резистора R_B , опір якого набагато більший за опір база-емітерного переходу транзистора. При збільшенні колекторного струму збільшується напруга на R_K . Внаслідок цього зменшується напруга на колектор-емітерному переході, що спричиняє зменшення струму бази через негативний зворотній зв'язок. Таким чином реалізується стабілізаційні властивості схеми, які визначаються відношенням R_K до R_B [40].

Схема емітерної стабілізації реалізує зворотній негативний зв'язок по струму з використанням резистора R_E . При збільшенні колекторного струму відповідно збільшується напруга, що виділяється на резисторі R_E , що спричиняє зменшення напруги на база-емітерному переході. За такою логікою реалізується стабілізаційні властивості схеми, які визначаються відношенням R_E до R_{B2} [40].

Для перевірки даних схем виконано схмотехнічний аналіз вихідного струму джерела живлення і підсилювача мікросхеми. При аналізі стабілізувався струм вихідних каскадів з використанням описаних вище

схем. Результати, отримані з урахуванням оптимізаційної процедури, занесені до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати схемотехнічного аналізу

Тиск, ГПа		0	1	2	3	4	5
Вихідний струм джерела живлення, мА	Без стабілізації	50	73,28	178,19	310,54	521,7	789,11
	Колекторна стабілізація	48	52,887	61,15	66,71	79,1	92,38
	Емітерна стабілізація	48	51,13	54,18	59,81	67,2	78,81
Вихідний струм підсилювача, мА	Без стабілізації	0,1	4,81	9,41	18,21	34,81	47,15
	Колекторна стабілізація	0,1	0,12	0,16	0,19	0,2	0,25
	Емітерна стабілізація	0,1	0,102	0,13	0,168	0,192	0,21

З отриманих даних видно, що схеми стабілізації значно зменшують значення вихідного струму, (порівняно з результатами без стабілізації), причому емітерна схема стабілізації показала кращі результати ніж колекторна. Такі стабілізаційні властивості можна пояснити тим, що при дії тиску компоненти, які мають забезпечувати стабілізацію параметрів також змінюють свої характеристики, але відбувається це за однаковим законом. Визначальним параметром стабілізації є відношення резисторів, яке під дією тиску залишається незмінним.

Колекторна стабілізація є ефективною тільки при великому опорі R_k або зі зменшенням опору R_6 в колі зворотного зв'язку. Практично це важко виконати, тому що величини опорів R_k і R_6 визначають необхідний режим спокою транзистора [41].

Емітерна стабілізація тим ефективніше, чим більше опір R_e і менше R_{62} , але слід пам'ятати, що зі збільшенням R_e на ньому зростає напруга і потужність, що виділяється, а зі зменшенням опору ділянки R_{62} збільшуються втрати потужності джерела живлення і зменшується вхідний опір каскаду [41].

Таким чином емітерна стабілізація є ефективнішою порівняно з колекторною, оскільки R_e і R_{62} не змінюють режим роботи транзистора. Висока стабільність робочої точки в даному випадку досягається завдяки наявності в схемі послідовної негативного зворотного зв'язку по постійному струму. Все падіння напруги на емітерному опорі прикладається до базового переходу.

У схемі колекторної стабілізації напруга на колекторі зменшується до напруги U_{be} , а через ділянку напруги, зменшується глибина негативного зворотного зв'язку, а значить і ефективність стабілізації. [42].

Для покращення стабілізації проведено оптимізаційний аналіз параметрів резисторів, для визначення найкращого співвідношення їх опорів. Вказані данні розраховувались при тиску 1 ГПа, на прикладі вихідного струму джерела живлення. Результати аналізу показані в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати оптимізаційного аналізу

Схема стабілізації	Струм, мА	Співвідношення
Колекторна	54,278	0,06
	52,887	0,03
	57,24	0,02
	67,15	0,01
Емітерна	61,127	0,5
	57,91	1
	51,13	5
	58,73	10

Оптимізація схеми колекторної стабілізації показала, що найкращий результат досягається при номіналах резисторів R_k 60 Ом і R_6 2 КОм. Оптимальне співвідношення складає 0,03.

Для емітерної стабілізації визначальними є опори резисторів R_e до R_{62} . Найкращі результати отримані при номіналах R_e 300 Ом і R_{62} 60 Ом. Оптимальне співвідношення складає 5.

Отримані співвідношення доцільно застосовувати для визначення необхідних номіналів резисторів при стабілізації вихідних параметрів каскадів мікросхеми в кожному конкретному випадку.

Виходячи з отриманих результатів емітерної стабілізації, проведено аналіз впливу тиску на вихідних характеристик ІМС (рис. 3.2) з використанням емітерної схеми стабілізації. Стабілізацію додано до каскаду вихідного підсилювача струму, внутрішнього джерела живлення та ЦАП. Попередньо розраховано оптимальні співвідношення резисторів для кожного каскаду. Результати показані в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати аналізу з урахуванням емітерної стабілізації

Тиск, ГПа	0	1	2	3	4	5
Вихідний струм джерела живлення, мА	50	51,13	54,18	59,81	67,2	78,81
Напруга аналогового виходу, В	2,5	2,581	2,751	2,861	2,973	3,1
Вихідний струм підсилювача, мА	0,1	0,102	0,13	0,168	0,192	0,21
Вихідна напруга ЦАП, мВ	13	15,261	21,581	27,54	33,85	37,81

Отримані результати вказують на те, що емітерна схема дозволяє стабілізувати вихідні характеристики до тиску в 1 ГПа. Але слід розуміти, що для цього необхідно розраховувати параметри схеми для кожного конкретного каскаду, що може значно збільшити час розробки. Проте отримані результати вказують на доцільність використання схемотехнічного методу компенсації для захисту від впливу тиску.

Таким чином, на сьогодні найоптимальнішим методом компенсації впливу тиску на зміну вихідних характеристик ІМС є використання емітерної схеми стабілізації струму у вихідних каскадах. Вона забезпечує кращу стабілізацію струму, порівняно з колекторною схемою стабілізації, що пояснюється схемотехнічними особливостями останніх.

Серед технологічних методів компенсації доцільно відмовитись від дифузійних резисторів, надаючи перевагу плівковим. Для компенсації струму можна використовувати рекомбінаційні пастки. Проте слід розуміти, що данні методи не є раціональними і значно збільшують розмір мікросхеми і вартість її виготовлення.

Поміж конструктивних методів компенсації можливе застосування кремнієвих корпусів та підкладок, та закріплення кристалу на підкладку за допомогою двосторонньої клейкої стрічки. Такі заходи нівелюють можливість виникнення деламінації та її вплив на характеристики ІМС. Але використання керамічних корпусів збільшує вартість корпусування і зменшує кількість можливих форм факторів мікросхеми.

Конструктивні та технологічні методи забезпечують деяку компенсацію, але вона лише частково покращує ситуацію і є швидше локальним рішенням проблеми для кожного конкретного випадку, ніж глобальним.

Порівняльна характеристика методів компенсації впливу тиску на характеристики ІМС показана в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Порівняльна характеристика методів компенсації

Метод	Реалізація	Результат
Технологічний	Внесення дефектів в кристалічну решітку	Зміна ширини забороненої зони
	Створення штучних рекомбінаційних пасток в товщі забороненої зони	Зменшення концентрації неосновних носіїв, що зменшить вихідний струм компонента
	Використання дискретних резисторів	Виключення впливу тиску на опір в ІМС
	Використання плівкових резисторів замість дифузійних	Виключення впливу тиску на опір в ІМС
Конструктивний	Використання керамічних корпусів	Зменшення ймовірності виникнення деламінації
	Використання керамічної підкладки	Зменшення ймовірності виникнення деламінації
	Кріплення кристалу до підкладки за допомогою двосторонньої клейкої стрічки	Нівелювання впливу тиску за рахунок амортизаційних властивостей плівки
	Зміна топологічного розміщення компоненту	Захист від дії локального тиску на кристал
Схемотехнічний	Колекторна схема стабілізації	Зменшення зміни вихідного струму компонентів
	Емітерна схема стабілізації	

Висновки по розділу 3

Розроблено процедуру аналізу впливу тиску на вихідні характеристики ІМС автомобільної промисловості. Обрано мікросхему, її вихідні та внутрішні електричні характеристики для дослідження впливу тиску на останні. Проведено схмотехнічний аналіз, який показав вплив тиску на зміну значення обраних характеристик. На основі отриманих даних розраховані коефіцієнти чутливості та розглянуто методи компенсації впливу тиску на характеристики ІМС.

Розроблена процедура аналізу є універсальною для дослідження будь-якої мікросхеми. Вона визначає набір груп вхідних параметрів, на основі яких проводиться схмотехнічний аналіз. Проаналізувавши результат аналізу визначено як саме тиск впливає на вихідні параметри мікросхеми. Використовуючи дані схмотехнічного аналізу розраховано коефіцієнти чутливості і визначено зміна параметрів якого компонента найбільше впливає на зміну вихідної характеристики мікросхеми. На основі коефіцієнтів чутливості виконується вибір варійованих параметрів та їх оптимізація. В даному дослідженні такий вибір недоцільний, оскільки навіть при найменшому впливі тиску, зміна вхідних параметрів така, що зменшити її шляхом оптимізації параметрів компонентів ІМС неможливо.

Проведено схмотехнічний аналіз мікросхеми, яка слугує для діагностики та обробки сигналів датчиків для подальшого перетворення в необхідну аналогову величину. Вона використовується в автомобільній промисловості для обробки сигналів з датчиків тиску, температури, струму та датчиків Холла. Особливістю такої мікросхеми є цифро-аналогова структура, що характерно для більшості мікросхем автомобільної промисловості. Вихідними параметрами, які досліджувались, обрано напругу аналогового виходу та струм споживання. Також досліджено зміну параметрів внутрішніх каскадів мікросхеми, а саме вихідний струм підсилювача, опір референтного резистора та вихідну напругу ЦАП. Зміна

цих параметрів демонструє приклад впливу тиску на характеристики реальної мікросхеми автомобільної промисловості.

У якості вхідні параметрів при схемо технічному аналізі використовувались зміна вихідного струму транзистора, опору резисторів та опорів транзисторних переходів при дії тиску в 1 ГПа, 2 ГПа, 3 ГПа, 4 ГПа та 5 ГПа, а також за нормальних умов. Аналізу виконувався за допомогою програми OrCAD 16.

Визначено, що струм живлення мікросхеми зростає експоненційно зі збільшенням тиску. Напруга аналогового виходу зростає до максимального вихідного значення. Вихідний струм підсилювача збільшується експоненційно зі збільшенням тиску. Вихідна напруга ЦАП зростає аналогічно зі збільшенням тиску. Опір референтного резистора зменшується експоненційно зі збільшенням тиску.

Розрахована відсоткова зміна напруги аналогового виходу мікросхеми перевищує 1%. Це означає, що дія тиску призводить до критичної зміни параметра, що є недопустимим для подальшого використання мікросхеми.

Розраховано коефіцієнти чутливості зміни вихідних параметрів мікросхеми і окремих каскадів до зміни характеристики компонентів. Розрахунок проводився за допомогою вбудованого пакету функцій OrCAD. Напруга аналогового виходу найбільш чутлива до зміни емітерного струму транзисторів. Зміна вихідного струму джерела живлення найбільше залежить від зміни емітерного струму транзисторів. Вихідний струм підсилювача має аналогічну залежність. Зміна вихідної напруги ЦАП найбільше залежить від зміни опору резисторів.

Досліджено методи компенсації впливу тиску на характеристики ІМС автомобільної промисловості. Серед технологічних методів не існує способу компенсації зміни ширини забороненої зони від дії тиску, що унеможливорює компенсацію зміни опору резисторів. Для виключення впливу тиску на опір резисторів доцільно відмовитись від дифузійної технології виготовлення резисторів на користь використання плівкових. Вплив тиску на вихідний

струм транзисторів і діодів можливо компенсувати використанням штучно створених рекомбінаційних пасток в товщі ширини забороненої зони. Проте, слід розуміти, що використання такого способу зменшить вихідний струм і в недеформованому напівпровіднику.

Дослідження конструктивного методу компенсації показало, що з використанням керамічного корпусу і підкладки мікросхеми, та закріплення кристалу з використанням двосторонньої клейкої стрічки забезпечує найменшу ймовірність виникнення деламінаційних процесів. Саме ці процеси спричиняють тиск в корпусі кристалу. Якщо створити порожнину в товщі корпусу, можливе повне уникнення впливу тиску на характеристики ІМС. Проте, така порожнина може стати причиною руйнування контактів між кристалом та корпусом внаслідок зсуву кристалу під впливом деламінаційних процесів.

Аналіз схемотехнічних методів компенсації показав, що емітерна схема стабілізації зменшує зміну вихідного параметру і може використовуватись для компенсації дії тиску на параметри ІМС. Отримано квазіоптимальне значення співвідношень резисторів, яке може бути використано при схемотехнічному проектуванні з урахуванням схем компенсації. Проведений схемотехнічний аналіз реальної мікросхеми показав, що така схема може стабілізувати вихідні параметри ІМС і застосовуватись в реальних умовах. Використання даних схем дозволяє вирішити задачу компенсації до тисків в 1 ГПа.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

У цьому розділі розкрито такі маркетингові аспекти створення стартапу, як: відбір ідей, створення концепції продукту, визначення перспектив ринкової реалізації проекту та розроблення маркетингової стратегії.

4.1. Опис ідеї проекту

Отримані в ході дослідження наукові і практичні результати можуть бути використані для проектування і виготовлення ІМС з покращеними характеристиками. Такі мікросхеми будуть стійкішими до впливу внутрішньої деформації, що може виникнути в товщі корпусу мікросхеми. Завдяки такому вдосконаленню надійність виготовлених ІМС буде вище, порівняно зі звичайними.

Далі проводиться поетапне розроблення стартап-проекту в чіткій відповідності до вимог методичних вказівок [43].

Зміст ідеї стартап-проекту, можливі напрямки застосування та вигоди для користувача наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка мікросхем із захистом від деформаційних впливів	Автомобільна промисловість	Підвищення надійності
	Аерокосмічна промисловість	Підвищення надійності
	Військова промисловість	Підвищення надійності

Таблиця 4.2 містить результати аналізу потенційних техніко-економічних переваг ідеї. Для цього визначено перелік техніко-економічних

властивостей та характеристик ідеї, а також попереднє коло конкурентів. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно з пропозиціями конкурентів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слаб. сторона)	N (нейтр. сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	NX P	Texas Inst.	Qualcomm			
1.	Захист від деформаційного впливу	В	Н	Н	Н			+
2.	Енергоефективність	С	С	В	В		+	
3.	Захист від зовнішніх впливів	В	С	В	В		+	
4.	Вартість	Н	С	В	В			+

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

У таблиці 4.3 міститься аналіз технологій, які можуть бути використані для реалізації ідеї.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Розробка мікросхем із захистом від деформаційних впливів	Використання схемотехнічних методів компенсації	Наявна	Доступна
		Використання конструктивних методів компенсації	Наявна	Доступна
		Використання технологічних методів компенсації	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: комбінації усіх вказаних технологій реалізації дозволить продукту більше виділятись на ринку відносно конкурентів.				

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначено ринкові можливості, які можна використати при впровадженні проекту. Це дозволить спланувати його напрями розвитку з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продажів, грн/ум. од	Невідомо
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока вартість процесу розробки та виготовлення
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Наявні, в залежності від сфери промисловості (автомобільна, аерокосмічна, військова)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	73%

Проаналізувавши дані, наведені вище, зрозуміло, що вихід на ринок є рентабельним. Мала кількість гравців на ринку та високий відсоток рентабельності дає змогу швидко покрити витрати.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності в поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Захист характеристик від деформаційного впливу	Державний та приватний сектори	Інтеграція з існуючими методами захисту, ціна	Відповідність стандартам, енергоефективність, надійність

Таблиця 4.6 – Фактори загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Невідповідність вимогам клієнтів	Продукт не відповідає вимогам клієнтів	Використання інших методів компенсації
2.	Економічний	Економічний стан країни- виробника	Зміна країни- виробника
3.	Якісний	Невідповідність стандартам галузі	Зміна технологічних процесів виробництва
4.	Вартість розробки та виготовлення	Підвищення вартості розробки та виготовлення	Оптимізації технологій розробки та виготовлення
5.	Конкуренція	Ім'я конкурентів є більш відомим на ринку	Проведення потужної рекламної кампанії
6.	Політичний	Політична ситуація країни- виробника	Зміна країни виробника

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Збільшення попиту	Різне збільшення зацікавленості до продукту	Підвищення виробництва
2.	Розробка нових методів компенсації	Використання різних методів компенсації в залежності від вимог клієнтів	Виготовлення мікросхем з різними методами компенсації

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється ця характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції – чиста	Мала кількість постачальників товару	Збільшення надійності запропонованих рішень
2. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний	Наявність замовників та виробників з інших держав	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою – міжгалузева	Використання у різних галузях	Проведення потужної рекламної кампанії
4. Конкуренція за видами товарів – товарно-видова	Запропонований товар є одного виду	Розробка нових методів компенсації
5. За характеристиками конкурентних переваг – нецінова	Основними є якість та надійність товару	Постійне покращення продукту
6. За інтенсивністю – марочна	Бренд є гарантом якості	Проведення рекламної кампанії

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Поста-чальники	Клієнти	Товари-замінники
	Texas Instruments	NXP, Qualcomm	X-Fab, Siliconix, Philips	Держ. та прив. сектори	Відсутні
Висновки:	Низька конкуренція	Вихід на ринок є відносно простим. Наявні потенційні конкуренти	Поста-чальник не повинен визначати ринкову ціну	Клієнти можуть диктувати умови через наявність конкуренції	Постійне оновлення та покращення товару

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння)
1.	Собівартість	Низька собівартість дає змогу зменшити кінцеву ціну продукту
2.	Клієнтоорієнтованість	Більша зацікавленість продуктом на ринку через індивідуальний підхід до вимог кожного клієнта
3.	Якість	Відповідність вимогам стандартів галузі, що забезпечить кращу конкурентоздатність
4.	Надійність	Забезпечення стабільних характеристик мікросхеми з плином часу

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Texas Instruments						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Собівартість	17		+					
2.	Клієнтоорієнтованість	16						+	
3.	Якість	20						+	
4.	Надійність	20							+

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Низька собівартість; Відсутність аналогів на ринку; Висока надійність.	Слабкі сторони: Збільшене енергоспоживання; Ускладнення технології виготовлення.
Можливості: Вихід на міжнародний ринок; Розробка нових методів компенсації; Вихід на нові галузі використання.	Загрози: Конкуренція; Економічна нестабільність; Політична нестабільність.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтований комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Збільшення власних прибутків	Середня	17 місяців
2.	Кооперація	Висока	18 місяців
3.	Суперництво (конкуренція)	Висока	27 місяців

Оскільки відносно не високий термін, як альтернативну ринкову поведінку обрано кооперацію, адже існує велика ймовірність отримання ресурсів.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державний сектор	висока	високий	низька	низька
2.	Приватний сектор	висока	високий	висока	висока

Які цільові групи обрано: приватний сектор є більш привабливим, оскільки простота входу у цей сегмент нижче ніж в державному секторі. Це пов'язано з наявністю великої кількості дозволів та відповідностей внутрішнім специфікаціям, які необхідно отримати для використання продукту.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренто- спроможні позиції до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Покращення технічних характеристик продукту, розробка нових методів компенсації.	Концентрований маркетинг	Адаптація до вимог ринку	Спеціалізації

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першо- прохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конку- рентної поведінки
1.	Ні	Комбінація	Ні	Виклик лідера

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто- спроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1.	Захист від впливу деформації	Спеціалі- зація	Розробка нових методів компенсації	Надійність, стабільність, ефективність.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Компенсації деформаційного впливу на характеристики ІМС	Реалізації захисту від впливу деформації	Ціна, готове рішення, надійність

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Мікросхема з покращеними характеристиками захисту від деформаційного впливу		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики Захист від деформаційного впливу	М/Нм -	Вр/Тх /Тл/Е/Ор Тх
	Якість: відповідність галузевим стандартам		
	Пакування: тип корпусу мікросхеми обирається згідно з вимогами замовника		
	Марка: Preprotics		
III. Товар із підкріпленням	До продажу – готові мікросхеми різного призначення		
	Після продажу – сервісна підтримка клієнтів, гарантійні зобов’язання		
Товар захищатиметься шляхом його патентування			

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	Невідомо	Від 10 у. о. до 100 у. о	Від 25000 у. о. до 1000000 у. о.	Від 5 у. о. до 250 у. о.

Обрано середній ціновий діапазон, для забезпечення конкурентоздатності, залучення нових клієнтів та підтримки доходів на необхідному рівні. Ціна за штуку може варіюватися в залежності від вимог замовника.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Продаж	Усебічний супровід товару до замовника, забезпечення гарантійного обслуговування та сервісна підтримка	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)

Основним каналом збуту є прямий продаж. Це загальноживана практика, оскільки малоімовірно вийти на великі об'єми виготовлення, а тому можна не користуватися послугами посередників продажі під час продажів.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Поява нового продукту дає змогу вирішити певні проблеми	Реклама, SMM, персональний продаж	Наявність готового рішення. Індивідуальний підхід до вимог клієнтів	Донести до потенційних клієнтів появу мікросхем з покращеними характеристиками	Переваги використання продукту

Маркетингова кампанія працюватиме завдяки прямим продажам та прямій рекламі через соцмережі. Головною ціллю рекламної кампанії є демонстрація переваг нового продукту.

Висновки по розділу 4

Отримані в ході дослідження наукові і практичні результати можуть бути використані для проектування і виготовлення ІМС з покращеними характеристиками.

Розроблено стартап-проект по продажу мікросхем з покращеними характеристиками захисту від деформаційного впливу. Використання таких мікросхем доцільно в галузях, де висуваються підвищені вимоги до стабільності та надійності роботи. До таких галузей відносяться автомобільна, аерокосмічна та військова.

Визначено зміст ідеї проекту. Для цього розглянуто потенційних клієнтів та можливі ризики реалізації продукції. Аналіз сильних та слабких сторін показав аспекти, на які слід звернути увагу при виході продукту на ринок. Проведено технічний аудит проекту. Обрано методи реалізації компенсації в мікросхемах.

Аналіз ринкових можливостей показав, що проект можливо комерціалізувати. Це пояснюється відсутністю аналогічних рішень на ринку і малою кількістю конкурентів, що полегшує вихід на ринок.

Для пришвидшення отримання першого прибутку можлива кооперація з гігантами промисловості, проте в перспективі здорова конкуренція принесе більше прибутків. Проте, це можливо лише при постійному розвитку продукту і розробці нових підходів до рішень проблем.

Аналіз усіх аспектів ринку показав, що імплементація проекту можлива в реальних умовах, проте слід враховувати, що на ринку вже існують компанії, які є потенційними конкурентами. Для успішності проекту слід проводити потужну рекламну кампанію, в якій доцільно продемонструвати переваги запропонованих рішень і причини вибору мікросхем саме цього стартап-проекту.

ВИСНОВКИ

В даній дисертаційній роботі вирішено актуальну та важливу науково-прикладну задачу з підвищення точності математичних моделей активних компонентів біполярних ІМС шляхом дослідження впливу тиску на електричні характеристики останніх, а саме розробку математичної моделі впливу та визначення методів компенсації такого впливу. При виконанні дослідження отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Проаналізувавши фізичні основи впливу тиску на напівпровідники, виявлено основні характеристики кремнію, які піддаються зміні при деформації. До таких характеристик належить концентрація основних і неосновних носіїв струму, яка збільшується з підвищенням тиску. Ширина забороненої зони, яка під впливом тиску в загальному випадку зменшується. Енергетичні рівні, які при деформаційному впливі зміщуються, що призводить до зміни ефективних мас та часу життя носіїв заряду. Ці параметри впливають на безпосередні електричні характеристики напівпровідникових діодів, транзисторів і резисторів, а саме на зміну ВАХ транзисторів та діодів, коефіцієнтів підсилення, опору резисторів, вихідних і вхідних струмів, тощо.
2. Запропоновано та розроблено методику експериментального вимірювання впливу неоднорідної деформації на характеристики інтегральних компонентів, що дає змогу порівняти теоретичні дані з експериментальними і тим самим перевірити правильність моделі.
3. Розроблено та перевірено математичні моделі впливу тиску на характеристики компонентів інтегральних мікросхем. Моделі реалізують розрахунок зміни опору кремнієвого резистора від тиску та зміну вихідного струму діода і транзистора. Аналіз формул, на основі яких розроблено моделі, показав, що вплив тиску зменшує ширину забороненої зони, внаслідок чого збільшується концентрація неосновних носіїв заряду. Зменшення опору пояснюється зменшенням ширини забороненої зони.

Оскільки струм р-n переходу визначається концентрацією неосновних носіїв у кожній області, то відповідне збільшення концентрації спричиняє збільшення струму.

4. Досліджено і показано, що існуюча залежність зміни ширини забороненої зони під дією тиску є неточною і не відповідає реальним даним. Тож для визначення даної залежності розроблено та перевірено нову формулу, яка визначає уточнюючі коефіцієнти для існуючої залежності. Для перевірки дослідження проводилось з пасивним та активним елементом. Це необхідно для того, щоб виключити з результатів вплив особливостей технологічних процесів виготовлення компонентів.

5. Досліджено і показано, що коефіцієнт підсилення струму біполярних транзисторів не залежить від дії тиску. Зміни зазнають лише вхідні та вихідні струми. Дослідження проводилось експериментальним шляхом, з використанням спеціального стенду.

6. Перевірка розроблених моделей показала, що результати розрахунків відповідають теоретичному сподіванню, що свідчить про достовірність моделі. Проаналізувавши отримані дані виявлено, що зміна ширини забороненої зони найбільше впливає на концентрацію неосновних носіїв. Також зміна ширини впливає на ефективну масу та час життя носіїв заряду, але такий вплив настільки малий, що при розрахунках прийнято цими змінами нехтувати. Результати дослідження свідчать про те, що зміна опору і струму відбувається за експоненціальним законом таким чином, що чим більший тиск, тим більша ступінь зміни параметру.

7. Підтвердження адекватності моделі проводилось за допомогою експериментальних вимірювань з використанням спеціального стенду. Точність вимірювання стендом складає 0,4 %. Для збільшення точності вимірювання проводились декілька разів. Порівняльний аналіз результатів вимірювання стендом та розрахованих даних вказує на адекватність моделі, оскільки розподіл значень відбувається за експоненціальним законом як в стендових вимірюваннях, так і модельованих. Відносна похибка моделі

склала 2,3 %, що свідчить про точність розробленої моделі. Якщо кількість вимірювань збільшити та не використовувати обмеження при розрахунках, то відносну похибку можна зменшити. Отримана точність моделі достатня для розуміння основних тенденцій змін характеристик напівпровідника під дією тиску і дозволяє проводити симуляції для дослідження впливу тиску на електричні характеристики біполярних мікросхем.

8. Розроблено і запропоновано процедуру аналізу впливу тиску на вихідні характеристики ІМС автомобільної промисловості. Процедура аналізу є універсальною для дослідження будь-якої мікросхеми. Вона визначає набір груп вхідних параметрів, на основі яких проводиться схмотехнічний аналіз.

9. Проведено схмотехнічний аналіз обраної мікросхеми. Вихідними параметрами, які досліджувались, обрано напругу аналогового виходу та струм споживання. Також досліджено зміну параметрів внутрішніх каскадів мікросхеми, а саме вихідний струм підсилювача, опір референтного резистора та вихідну напругу ЦАП. Зміна цих параметрів демонструє приклад впливу тиску на характеристики реальної мікросхеми автомобільної промисловості. Визначено, що струм живлення мікросхеми зростає експоненційно зі збільшенням тиску. Напруга аналогового виходу зростає до максимального вихідного значення. Вихідний струм підсилювача збільшується експоненційно зі збільшенням тиску. Вихідна напруга ЦАП зростає аналогічно зі збільшенням тиску. Опір референтного резистора зменшується експоненційно зі збільшенням тиску.

10. Розраховано коефіцієнти чутливості зміни вихідних параметрів мікросхеми і окремих каскадів до зміни характеристики компонентів. Напруга аналогового виходу найбільш чутлива до зміни емітерного струму транзисторів. Зміна вихідного струму джерела живлення найбільше залежить від зміни емітерного струму транзисторів. Вихідний струм підсилювача має аналогічну залежність. Зміна вихідної напруги ЦАП найбільше залежить від зміни опору резисторів.

11. Досліджено методи компенсації впливу тиску на характеристики ІМС автомобільної промисловості. Серед технологічних методів не існує способу компенсації зміни ширини забороненої зони від дії тиску, що унеможлиблює компенсацію зміни опору резисторів. Для виключення впливу тиску на опір резисторів доцільно відмовитись від дифузійної технології виготовлення резисторів на користь використання плівкових. Вплив тиску на вихідний струм транзисторів і діодів можливо компенсувати використанням штучно створених рекомбінаційних пасток в товщі ширини забороненої зони. Проте, слід розуміти, що використання такого способу зменшить вихідний струм і в недеформованому напівпровіднику.

12. Дослідження конструктивного методу компенсації показало, що з використанням керамічного корпусу і підкладки мікросхеми, та закріплення кристалу з використанням двосторонньої клейкої стрічки забезпечує найменшу ймовірність виникнення деламінаційних процесів. Саме ці процеси спричиняють тиск в корпусі кристалу. Якщо створити порожнину в товщі корпусу, можливе повне уникнення впливу тиску на характеристики ІМС. Проте, така порожнина може стати причиною руйнування контактів між кристалом та корпусом внаслідок зсуву кристалу під впливом деламінаційних процесів.

13. Аналіз схемотехнічних методів компенсації показав, що емітерна схема стабілізації зменшує зміну вихідного параметру і може використовуватись для компенсації дії тиску на параметри ІМС. Отримано квазіоптимальне значення співвідношень резисторів, яке може бути використано при схемотехнічному проектуванні з урахуванням схем компенсації. Проведений схемотехнічний аналіз реальної мікросхеми показав, що така схема може стабілізувати вихідні параметри ІМС і застосовуватись в реальних умовах.

14. Розроблено стартап-проект по продажу мікросхем з покращеними характеристиками захисту від деформаційного впливу. Використання таких мікросхем доцільно в галузях, де висуваються підвищені вимоги до

стабільності та надійності роботи. До таких галузей відносяться автомобільна, аерокосмічна та військова. Аналіз усіх аспектів ринку показав, що імплементація проекту можлива в реальних умовах, проте слід враховувати, що на ринку вже існують компанії, які є потенційними конкурентами. Для успішності проекту слід проводити потужну рекламну кампанію, в якій доцільно продемонструвати переваги запропонованих рішень і причини вибору мікросхем саме цього стартап-проекту.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на XII міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2019», м. Київ, квітень, 2019 р.

Усе вищевикладене дає змогу зробити висновок, що завдання на магістерську дисертацію виконано у повному обсязі, а її мета досягнута.

Список використаної літератури

1. Ножилов О. П. Электротехника и электроника / О. П. Ножилов. – Москва: Юрай, 2016. – 288 с.
2. Титце У. М. Полупроводниковая схемотехника / У. М. Титце, К. В. Шенк. – Москва: ДМК Прес, 2008. – 105 с.
3. Щука А. А. Электроника / А. А. Щука. – С-П.: БХВ Петербург, 2008. – 415 с.
4. Белоус А. И. Основы схемотехники микроэлектронных приборов /А. И. Белоус, В. А. Эмельянов, А. С. Туцевич –Москва: Техносфера, 2012. – 472 с.
5. Водовозов А. М. Основы электроники / А. М. Водовозов. – Москва: Инфра-Инженерия, 2016. – 130 с.
6. Кочемировский В. А. Дефекты кристаллической структуры полупроводниковых материалов / А. В. Кочемировский, И. А. Соколов. – С-П.: Издательский дом СПбГУ, 2013. – 94 с.
7. Гантмахер В. Ф. Рассеивание носителей тока в металлах и полупроводниках / В. Ф. Гантмахер, И. Б. Левинсон. – Москва: Наука, 1984 – 214 с.
8. Полякова А. Л. Физические принципы работы полупроводниковых датчиков механических величин / А. Л. Полякова // Акустический журнал – 1972. – № 1. С. 1-22.
9. Rinder W. B. The resistance of the elastically deformed p-n transition / W. B. Rinder, I. D. Braun // Applied Physics – 1973. – № 7. С. 58-72
10. Sach C. M. Generation and recombination of carriers in the p-n transition characteristics / C. M. Sach, H. T. Noys // IEEE Trans – 1989. – № 9. С. 18-24.
11. Полякова А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / А. Л. Полякова – Москва: Энергия, 1979. – 186 с.
12. Елинсон В. И. Чувствительность тока диодов Шоттки к давлению / В. И. Елинсон, А. Л. Покалякин // Радиотехника и электроника – 1981. – № 1. С. 210-212.

13. Полякова А. Л. Полупроводниковые диоды с барьером Шоттки / А. Л. Полякова, О. Ю. Сильвестрова // Акустика – 1984. – № 1. С. 147-154.
14. Rideont W. L. Sensitivity to mechanical pressure of Schottky diodes / W. L. Rideont, C. R. Kromwel // Applied Physics – 1987. – № 10. С. 329-331.
15. Аверченков О. А. Схемотехника: аппаратура и программы / О. А. Аверченков Москва: ДМК, 2012. – 588 с.
16. Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов / Г. Е. Пикус – Москва: Наука, 1987. – 525 с.
17. Сыркин Л. Н. Физика биполярных транзисторов / Л. Н. Сыркин, Н. Н. Феоктисова – Москва: Наука, 1989. – 300 с.
18. Игумнов В. Н. Физические основы микроэлектроники / В. Н. Игумнов – Москва: DirectMedia, 2014. – 358с.
19. Чаплыгина Ю.А. Нанотехнологии в электронике / Ю. А. Чаплыгина – Москва: Техносфера, 2013. – 688 с.
20. Агеева О.А. Информационно измерительная техника и электроника / О.А. Агеева. – Москва: Юрайт, 2018. – 158 с.
21. Ануфриев Л. П. Технологии интегральной электроники /Л. П. Ануфриев, С. В. Бордусов. – Минск: Интегралполиграф, 2009. – 379 с.
22. Платт Ч. В. Энциклопедия электронных компонентов / Ч. В. Платт, В. К. Янсон. – С-П.: БХВ Петербург, 2016. – 215 с.
23. Воробьёв Д. В. Характеристики и источники механических воздействий на радиоэлектронные устройства / В. Д. Воробьёв, С. Н. Реута // Молодой ученый. – 2014. – № 19. С. 182-185.
24. Інтегральні резистори [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studopedia.su/10_64130_integralnie-rezistori.html (дата звернення: 21.01.2019). – Назва з екрана.
25. Характеристики інтегральних резисторів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/3309825/page:15/> (дата звернення: 21.01.2019). – Назва з екрана.

26. Mark A. M. Improved product reliability / A. M. Mark, T. W. Kala – California: Teratrade, 2003. – 313 с.
27. Антонюк В. С. Методологія наукових досліджень / В. С. Антонюк, Л. Г. Полонський – Київ: НТУУ “КПІ”, 2015. – 274 с.
28. Злепко С. М. Основи біомедичного радіоелектронного апаратобудування / С. М. Злепко, С. В. Павлов, Л. Г. Коваль, І. С. Тимчик – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 133 с.
29. Сигорский В. П. Математичний апарат інженера / В. П. Сикорский – Київ: Техніка, 1975. – 768 с.
30. Скурихін В. І. Математичне моделювання / В. І. Скурихін, В. Б. Шифрін, В. В. Дубровський – Київ: Техніка, 1983. – 270 с.
31. Чемоданов Б. К. Математические основы теории автоматического регулирования / Б. К. Чемоданов – Москва: ВШ, 1997. – 600 с.
32. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. / С. М. Зи – Москва: Мир, 1984. – 456 с.
33. Езерский В. В. Методы аппроксимации функций. / В. В. Езерский – Омск: СибГУФК, 2011. – 152 с.
34. Визначення ширини забороненої зони [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://cito-web.yspu.org/link1/lab/lab_atom/lab_atom11.pdf (дата звернення: 11.04.2019). – Назва з екрана.
35. Рекомбінація через локальні домішкові рівні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.foez.narod.ru/17.htm> (дата звернення: 11.04.2019). – Назва з екрана.
36. Корпусування інтегральних мікросхем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.symmetron.ru/suppliers/infineon/files/pdf/infineon/INF14.pdf> (дата звернення: 11.04.2019). – Назва з екрана.
37. Монтаж кристалу в корпус [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://equip.eltech.com/catalog/5831> (дата звернення: 11.04.2019). – Назва з екрана.

38. Сучасна компоновка мікросхем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.kit-e.ru/articles/device/2007_2_152.php (дата звернення: 11.04.2019). – Назва з екрана.
39. Корпусування кристалів в корпус із застосуванням технології DAF [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ostec-group.ru/group-ostec/pressroom/articles/tekhnologii/korpusirovanie-mnogovyvodnykh-mikromoduley-v-plastikove-korpusa-s-primeneniem-daf/> (дата звернення: 11.04.2019). – Назва з екрана.
40. Ножилов О. П. Электротехника и электроника. Часть 1 / О. П. Ножиов. – Москва: Юрай, 2018. – 382 с.
41. Емітерна і колекторна схеми стабілізації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studopedia.org/1-13810.html> (дата звернення: 18.04.2019). – Назва з екрана.
42. Ефективність схем стабілізації струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://digteh.ru/Sxemoteh/ShTrzKask/KollStab/> (дата звернення: 18.04.2019). – Назва з екрана.
43. Гавриш О. А. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

УДК 621.391.26

Вимірювальний стенд для дослідження впливу неоднорідної деформації на компоненти біполярних ІМС

Зилевіч М. О.

e-mail: zila@meta.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.uaКафедра промислової електроніки keoa.kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—У роботі спроектовано стенд для дослідження впливу неоднорідної деформації на компоненти біполярних ІМС. Даний стенд призначений для вимірювання опору кремнієвих резисторів, вольт-амперних характеристик діодів та транзисторів під дією відомої неоднорідної деформації з відображенням отриманої інформації на екран персонального комп'ютера для подальшої обробки. Стенд дозволяє регулювати тиск у широкому діапазоні та є універсальним для вимірювання електричних характеристик різних компонентів мікросхем.

Ключові слова — деформація, тиск, вольт-амперна характеристика, опір, деламінація.

I. Вступ

Однією з важливих складових надійності мікросхем є цілісність та відсутність зовнішніх впливів на кристал у корпусі [1]. Наслідком зовнішніх впливів є деламінація підкладки кристалу в корпусованій мікросхемі. Цей процес спричиняє неоднорідний тиск на кристал в мікросхемі. Це призводить до зміни параметрів та характеристик ІМС, що, в свою чергу, є причиною виходу з ладу пристрою чи системи в цілому [2].

Метою цієї роботи є проектування стенду для дослідження впливу неоднорідної деформації на компоненти біполярних ІМС. Стенд повинен характеризуватися точністю та універсальністю вимірювання, а також можливістю регулювання тиску, що діє на зразок.

Стенд планується використовувати для експериментального дослідження впливу деламінації на компоненти біполярних ІМС, побудови моделей такого впливу, та обґрунтування вибору методів його компенсації.

II. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Деламінація – це процес розшарування композитного матеріалу [3]. В корпусованій мікросхемі це явище відбувається з підкладкою, що знаходиться між кристалом і дном корпусу. Приклад такого процесу зображено на рис. 1.

Причинами такого процесу є перепади температури та вологості в навколишньому середовищі використання, нерівномірне зчеплення шарів і наявність порожнин між ними, а також дефекти обробки

матеріалів та корпусу [4]. З плином часу ці фактори призводять до деламінації, причому в процесі виникнення розшарування усередині корпусу збільшується внутрішнє напруження матеріалів, яке поступово збільшується аж до моменту виникнення тріщини в корпусі, що зніме усі внутрішні напруження.

Описане вище явище спричиняє неоднорідну деформацію кристалу мікросхеми. Під неоднорідною деформацією розуміється виникнення локального тиску, що діє на поверхню кристалу [5]. Такий тиск є достатнім для зміни електричних характеристик компонентів ІМС. До того ж чим більший тиск, тим більша зміна параметрів елементів [6].

Фізика зміни характеристик елементів описується явищем тензорезистивного ефекту в напівпровідниках. Як відомо кристалічна решітка кремнію володіє кубічною симетрією. Якщо його піддавати дії деформації, то симетрія в загальному випадку буде знижуватись. Це спричинить зміщення енергетичних рівнів і перерозподіл носіїв струму між ними, що, в свою чергу, призведе до зміни електричних властивостей напівпровідника [7].

При дії тиску енергетичні рівні зміщуються, що призводить до зменшення ширини забороненої зони і збільшення концентрації основних і неосновних носіїв струму, та зміни ефективних мас і часу життя носіїв заряду [8]. Такі перетворення впливають на електричні характеристики напівпровідникових діодів, транзисторів і резисторів, а саме на зміну ВАХ, коефіцієнтів підсилення, опору резисторів, вихідних і вхідних струмів, тощо. Під впливом тиску опір кремнієвого резистора, напруга відкриття транзистора і діода зменшується.



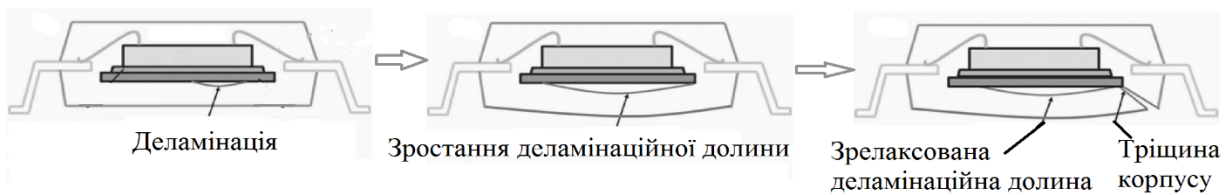


Рис. 1. Деламінація мікросхеми в корпусі

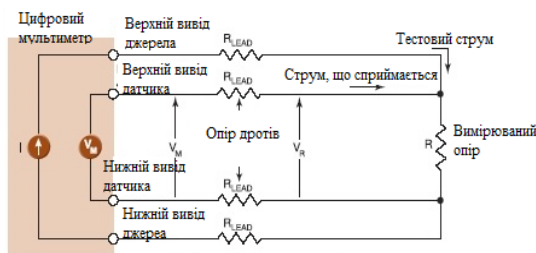


Рис. 2. 4-х контактна схема вимірювання

III. МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ

Для дослідження впливу тиску на компоненти ІМС необхідно вимірювати напругу, опір і струм, а також діяти індентером з відомою силою на кристал напівпровідника. Визначення опору доцільно проводити за методом Кельвіна, також відомого як 4-х контактний метод (рис. 2). Він заснований на пропусканні струму і вимірюванні напруги, яка виділяється на невідомому опорі [9]. Особливістю методу є те, що струм протікає через один набір проводів, що підводять, у той час як напруга сприймається іншим набором провідників. Напруга вимірюється безпосередньо на резистивному елементі, а не в тій точці, де підключене джерело струму. Таким чином опір підведених проводів повністю виключається зі схеми, що дозволяє точно фіксувати зміну опору.

Для вимірювання ВАХ напівпровідникових приладів застосовується високоточний мультиметр, що забезпечить точність та універсальність вимірювань як для діодів, так і для транзисторів.

Для симуляції неоднорідної деформації необхідно реалізувати механічний вплив на кристал для чого доцільно використовувати гостру або закруглену на кінці голку з діелектричного матеріалу. Це дає змогу сконцентрувати тиск на якомога меншій площі, при цьому голка не буде вносити ніяких електричних завад до об'єкта вимірювання [10]. Така голка закріплюється в механічний прес, до якого підключений динамометр, що фіксує тиск.

У стенді, що розробляється, 4-х контактна схема реалізована на базі високоточного мультиметра, за допомогою якого також буде вимірюватись вольтамперна характеристика діодів і транзисторів. У якості динамометра використовується датчик сили.

IV. СТРУКТУРА СТЕНДУ

Структурну схему стенду показано на рис.3. Для візуалізації та обробки отриманих даних пропонується використовувати ПК, хоча для цієї задачі може бути розроблений окремий пристрій.

Блок комутації забезпечує зв'язок між блоком обробки сигналу датчика сили та ПК для фіксації тиску, що діє на зразок.

Блок обробки сигналу датчика сили перетворює аналоговий сигнал з датчика в цифровий для подальшої обробки на ПК.

Блок реалізації тиску складається з датчика сили, що вимірює тиск, який створює голка на зразок, та механічного преса. Механічний прес реалізує керування тиском, що діє на зразок.

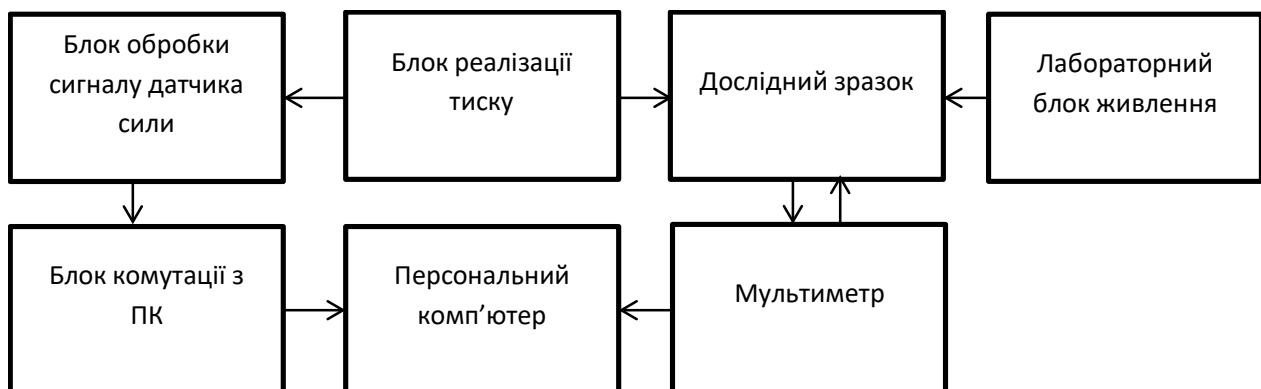


Рис. 3. Структурна схема стенду

ТАБЛИЦЯ 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОТРИМАНІ ДАНІ

Тиск, Па	Ітерація	Опір резистора, Ом	Відносна похибка	Напруга відкриття діода, В	Відносна похибка	Напруга відкриття транзистора, В	Відносна похибка
10^6	1	2,2138	1×10^{-3}	0,6850	3×10^{-3}	0,5436	2×10^{-3}
	2	2,2178		0,6877		0,5416	
	3	2,2101		0,6796		0,5433	
10^7	1	2,1641	4×10^{-3}	0,6089	4×10^{-3}	0,5128	3×10^{-3}
	2	2,159		0,6054		0,5154	
	3	2,1681		0,6101		0,514	
10^9	1	1,9804	3×10^{-3}	0,5166	3×10^{-3}	0,4759	2×10^{-3}
	2	1,9824		0,5133		0,4771	
	3	1,9874		0,5152		0,4723	

Мультиметр виконує 4-х контактне вимірювання опору резисторів, ВАХ діодів та транзисторів з подальною комутацією з ПК через вбудований інтерфейс.

Лабораторний блок живлення необхідний для подачі різномірної тестової напруги і струму на дослідний зразок.

Дослідний зразок являє собою декапсульований кристал для доступу до його компонентів.

Розроблена структурна схема дає можливість проводити високоточні вимірювання опору резисторів, ВАХ діодів та транзисторів під впливом регульованого тиску. Особливістю такої схеми є простота та низька вартість реалізації, а також можливість конфігурування складових у залежності від необхідних умов.

V. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ СТЕНДУ

Для візуалізації і обробки отриманих даних використовується програма, розроблена в графічній оболонці LabVIEW, яка запускається на ПК, до якого, за допомогою USB, підключається мультиметр та блок обробки даних з датчика сили через відповідний блок. Застосовано високоточний мультиметр Keithley 2100, який реалізує як 4-х контактну схему вимірювання, так і звичайну 2-х контактну, та має вбудований інтерфейс для підключення до ПК через USB. У якості датчика сили у блоці реалізації тиску використано аналоговий тензодатчик Tescis F2210 з діапазоном вимірювання від 0 Н до 1000 Н з похибкою у 0,025 Н, та механічний прес. Блок обробки сигналу з датчика сили реалізований на АЦП HX711, розрядність перетворення складає 24 біти. Інтерфейс для підключення АЦП HX711 до ПК реалізовано з використанням мікроконтролера Arduino Nano, який здійснює перетворення даних з АЦП в необхідний формат передачі.

Забезпечення тестової напруги і струму для дослідних зразків реалізує лабораторний блок живлення Nameg HM7042-5 – це високоточний лабораторний блок живлення на 3 канали, з допустимою напругою до 32 В і струмом до 5 А на канал.

Похибка вимірювання цим стендом визначається похибкою мультиметра і складає $\pm 0,001$ В для напруги, та $\pm 0,0001$ А для струму. Також похибку в $\pm 0,025$ Н вносить датчик вимірювання сили.

Експериментальні результати вимірювання впливу тиску на електричні характеристики напівпровідникових елементів (кремнієвий резистор з номінальним опором 2,2 Ом, діод, біполярний транзистор) наведені в таблиці. 1.

Тиск в 10^6 Па відповідає нормальним умовам, на зразок не діє деформаційний вплив. Дослідження проводилось у 3 ітерації для перевірки точності вимірювання, з поетапним збільшенням тиску.

Як видно з результатів експериментального дослідження опір резистора зменшується, оскільки концентрація носіїв струму під тиском зростає. Вимірювання напруги відкриття транзисторів і діодів проводилось таким чином, що фіксувалась напруга, при якій вихідний струм становитиме 50 мА. Отримані результати показують, що напруга відкриття зменшується, що відповідає теоретичним даним: при дії тиску ширина забороненої зони зменшується, що призводить до зменшення напруги відкриття діоду і транзистора. Отримана відносна похибка вимірювання для опору і напруги складає 4×10^{-3} .

ВИСНОВКИ

Розроблено стенд для вивчення впливу неоднорідної деформації на компоненти біполярних ІМС, до складу якого входять джерело живлення, датчик сили та ПК. Для точності вимірювання застосовано мультиметр Keithley 2100. Для збільшення точності вимірювання використано лабораторний блок живлення Nameg HM7042-5. Фіксація прикладеного тиску відбувається за допомогою аналогового датчика Tescis F2210, сигнал якого оцифровується мікросхемою HX711. Керування тиском відбувається завдяки механічному пресу.

Особливістю стенду є низька вартість реалізації та простота його виготовлення. Реалізовано можливість регулювання впливу тиску та забезпечено універсальність використання для різних компонентів мікросхем, а також можливість конфігурування складових стенду в залежності від завдання дослідження.

Основними перевагами розробленого стенду є:

- конфігурування складових стенду в залежності від вимог дослідження;
- висока точність вимірювання (відносна похибка вимірювання не перевищує 4×10^{-3} ;

- можливість регулювання тиску, що діє на зразок;
- універсальність вимірювання (резистор, транзистор, діод);
- можливість вимірювання характеристик діодів і транзисторів у різних режимах завдяки лабораторному блоку живлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Hnatek E. R. "Integrated Circuit Quality and Reliability," New York, *Marcel Deker.*, 1995. URL: <http://catcut.net/qX7A>
- [2] Levin M., Kala T. I. "Improving product reliability," California, *Wiley.*, 2003. ISBN: 978-0-470-86449-4
- [3] Vorobyov D. V. "Harakteristiki ta dzhherela mehanichnih vpliviv na radioelektronni zasobi," *Molodiy vcheniy.* no. 19. pp. 182-185, 2014. URL: <https://moluch.ru/archive/78/13692/>
- [4] Lee Y. C. "Micro- and Opto- Electronic Materials and Structures," California, *Springer.*, 2007. URL: <https://www.springer.com/us/book/9780387279749>
- [5] Kochemirovskiy V. A. "Defekti kristallichnoyi strukturi naplyprovodnikovih materialiv," *Vidavnichiy dlm SPGU.*, 2013. URL: goo.gl/P7pCgF
- [6] Polyakova A. L. "Deformatsiya naplyprovodnikov i naplyprovodnikovih priystroyiv," Moskva, *Energlya.*, 1979. URL: <https://www.twirpx.com/file/560929/>
- [7] Brotherton S. D. "Introduction to Thin Film Transistors: Physics and Technology of TFTs," Switzerland, *Springer.*, 2013. URL: <http://haa.su/FZv/>
- [8] Rudolf F. G. "Modern Dictionary of Electronics," Melborne, *Newnes.*, 1999. URL: goo.gl/cYTqAp
- [9] Metod Kelvina [Online], Available: <http://shemabook.ru/kelvina-4-provodnoy-izmereniya-soprotivleniya>. [Accessed: 09-Feb-2019].
- [10] Widmann D. "Technology of Integrated Circuits," Berlin, *Springer.*, 2000. URL: goo.gl/vXaxhs

УДК 621.391.26

Измерительный стенд для исследования влияния неоднородной деформации на компоненты биполярных ИМС

Зылевич М. О.

e-mail: zila@meta.ua

Национальный технический университет Украины

“Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” kpi.uaКафедра конструирования электронно-вычислительной аппаратуры keoa.kpi.ua

Киев, Украина

Реферат — В работе спроектировано стенд для исследования влияния неоднородной деформации на компоненты биполярных ИМС. Данный стенд предназначен для измерения сопротивления кремниевых резисторов, вольт-амперных характеристик диодов и транзисторов под действием известной неоднородной деформации с отображением полученной информации на экран персонального компьютера для дальнейшей обработки. Стенд позволяет регулировать давление в широком диапазоне и является универсальным для измерения электрических характеристик различных компонентов микросхем.

Ключевые слова — деформация; давление; вольт-амперная характеристика; сопротивление; деламация.



UDC 621.391.26

Measuring stand for investigation of the influence of inhomogeneous deformation on the bipolar mass components

M. O. Zylevich

e-mail: zila@meta.ua

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» kpi.uaDepartment of designing electronic computing equipment keoa.kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract — In this work, a bench was designed to study the effect of heterogeneous deformation on components of bipolar ICs. This stand is designed to measure the resistance of silicon resistors, voltage-current characteristics of diodes and transistors under the action of a known inhomogeneous deformation, with the display of received information on the screen of a personal computer for further processing. One of the important components of the reliability of the chips is the integrity and absence of external influences on the crystal in the case. The consequence of external influences is the deposition of the substrate of the crystal in the casing chip. This process causes inhomogeneous pressure on the crystal in the chip. This results in changes in the parameters and characteristics of the IC, which, in turn, causes the malfunction of the device or system as a whole. The purpose of this work is to design a bench for studying the effect of heterogeneous deformation on components of bipolar ICs. The stand should be characterized by precision and versatility of measurement, as well as the ability to regulate pressure acting on a similar basis. The stand is planned to be used for experimental study of the influence of delamination on components of bipolar ICs, the construction of models of such influence, and justification for choosing methods for its compensation. Delamination is a process of bundle of composite material. In the case of a chip, this phenomenon occurs with the lining located between the crystal and the bottom of the case. The reasons for this process are the temperature and humidity variations in the environment, the uneven grip of the layers and the presence of cavities between them, as well as the defects in the materials and the housing. Over time, these factors lead to delamination, and in the process of bundle inside the case, the internal stress of the materials increases, which gradually increases up to the moment of a crack in the case, which will remove all internal stresses. The phenomenon described above causes heterogeneous deformation of the chip of the chip. Under heterogeneous deformation it is understood that the occurrence of local pressure acting on the surface of the crystal. Such pressure is sufficient to change the electrical characteristics of the components of the IC. Moreover, the greater the pressure, the greater the change in the parameters of the elements. The stand allows you to control the pressure in a wide range and is versatile to measure the electrical characteristics of different components of the chip. study of the influence of heterogeneous deformation on components of bipolar ICs. The stand includes a power source, a power sensor and a PC. For precision measurements, the Keithley 2100 multimeter was used. The Hameg HM7042-5 laboratory power supply was used to increase the accuracy of the measurement. The applied pressure is fixed using an analog sensor Tecsia F2210, whose signal is digitized by the chip HX711. Pressure control is due to the mechanical press. The booth's specialty is the low cost of implementation and the ease of its production. the possibility of configuring the components of the stand depending on the task of the study.

Keywords – deformation; pressure; voltage-ampere characteristic; resistance; delamination.

